

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program: strojírenská technologie

Zaměření: obrábění a montáž

Výzkum sil na hřbetu řezných nástrojů.

Examination of forces on the rear side of the cutting tool.

KOM - 1148

Andrey Dugin

Vedoucí práce:

Prof. Ing. Alexey Popov DrCs, TU v Liberci.

Konzultant:

Ing. Lucie Vrkoslavová, TU v Liberci.

Počet stran:.....59

Počet příloh:.....3

Počet tabulek:.....6

Počet obrázků:.....39

4.01.2011

Výzkum sil na hřbetu řezných nástrojů.

ANOTACE:

Tato diplomová práce je věnována zkoumání sil na hřbetu řezného nástroje. Cílem práce bylo navrhnout novou rychlejší metodu pro určení sil na hřbetu pro různé obráběné materiály. Během práce byly zkoumány závislosti hodnot síly na hřbetu na řezných podmínkách, druhu obráběného materiálu a šířky opotřebení na hřbetu nástroje. Také bylo provedeno hodnocení přesnosti teoretických výsledků získaných pomocí matematického modelů pro určení sil na hřbetu.

Klíčová slova: SÍLY NA HŘBETU, MIKROTVRDOST, MIKROOBRÁBĚNÍ,
MIKROFRÉZOVÁNÍ.

Examination of forces on the rear side of the cutting tool.

ANNOTATION:

This degree thesis is devoted to the examination of forces on the rear side of the cutting tool. The objective of this work was to offer a new accelerated method for determining the forces on the rear side for different work piece materials. During the work, we examined the dependence of magnitude of force on the rear side of the cutting conditions, the type of work piece material and the width of the wear of the rear side of the tool. Also was assessed the accuracy of the theoretical results obtained using a mathematical model to determine the forces on the rear side.

Klíčová slova: FORCES ON THE REAR SIDE, MICROHARDNESS,
MICROCUTTING, MICROMILLING.

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2011

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 59

Počet příloh: 3

Počet obrázků: 39

Počet tabulek: 6

Počet diagramů: 9

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Alexejovi Popovovi, DrSc. za odborné vedení diplomové práce, cenné rady a připomínky, které mi pomohly vypracovat tuto práci. Dále, bych rád poděkoval celému kolektivu Katedry Obrábění a montáže za pomoc v průběhu vypracování práce, a Prof. Ing. Petrovi Loudovi, CSc. za poskytnuté konzultace.

OBSAH

Seznam symbolů a zkratk.....	10
Úvod.....	11
1. Teoretická část.....	13
1.1. Řezné síly při obrábění.....	13
1.2. Řezné síly na hřbetu řezných nástrojů.....	15
1.3. Mikroobrábění.....	17
1.4. Řezné síly na hřbetu při mikroobrábění.....	21
1.5. Shrnutí poznatků o řezných silách při obrábění.....	21
1.6. Metody měření sil na hřbetu.....	22
1.6.1. Měření síly řezání na hřbetu metodou změny tloušťky seříznuté vrstvy.....	23
1.6.2. Měření síly na hřbetu metodou volby předního úhlu.....	24
1.6.3. Měření síly řezu na hřbetu metodou srovnání sil, řezání při různých opotřebeních zadní plochy.....	25
1.6.4. Měření síly řezání na hřbetu metodou kosoúhlého řezu.....	26
1.6.5. Měření síly řezání na hřbetu metodou rozřezávacího nože....	28
2. Navržení metodiky zkoumání sil na hřbetu řezných nástrojů v laboratoři KOM TUL.....	29
2.1. Schéma experimentu.....	29
2.2. Realizace schématu měření v laboratoři KOM TUL.....	29
2.3. Siloměr KISTLER.....	31
2.4. Nože pro hoblování.....	31
2.5. Popis nástrojařské brusky.....	32
2.6. Nástrojová lupa Brinell.....	33
2.7. Zkušební vzorky.....	33
3. Realizace zkoušky pro zjištění řezné síly metodou měření tloušťky třísky.....	34
3.1. Výsledky experimentů.....	36
3.2. Vliv obráběného materiálu na sílu na hřbetu.....	41
3.3. Závislost síly na hřbetu na opotřebení nástroje na hřbetu.....	45
4. Urychlená metoda určení řezných sil na hřbetu v závislosti na mikrotvrdosti obráběného materiálu.....	47

5. Kontrola přesnosti matematického modelu profesora Hrubého pro výpočet řezné síly na hřbetu při obrábění různých materiál.....	54
6. Závěr.....	58
Seznam literatury.....	60
Seznam příloh.....	61

Seznam symbolů a zkratk.

VB	šířka opotřebení na hřbetu nástroje [mm]
F_c	řezná síla [N]
F_f	posuvová síla [N]
F_p	pasivní síla [N]
F	výsledná řezná síla [N]
V_c	řezná rychlost [m/min]
V_f	rychlost posuvu [m/min]
V_e	rychlost výsledného řezného pohybu [m/min]
R	výsledná řezná síla [N]
F_t	třecí síla na čele nástroje [N]
F_N	normálová složka síly na čele nástroje [N]
γ_o	nástrojový úhel čela ortogonální [grad]
α_o	nástrojový úhel hřbetu ortogonální [grad]
a_p	hloubka záběru [mm]
D	diametr, průměr [mm]
f_z	posuv na zub [mm/zub]
n	otáčky nástroje [1/mm]
Ra	jednotka drsnosti povrchu [μm]
μm	mikrometr
V	řezná rychlost [m/min]
HB	tvrdost podle Brinella
HV	tvrdost podle Vickerse
ČSN	česká technická norma
KOM	katedra obrábění a montáže

ÚVOD.

Za nepřítomnosti nárůstku se volně řezný element dotýká zpracovaného materiálu ve dvou pracovních plochách: v přední ploše (čelo) a zadní ploše (hřbet).

Síly působící na čelo řezného elementu zajišťují proces tvoření třísky. Síly působící na hřbetu řezného elementu se neúčastní tvoření třísky a vznikají v důsledku pružné reakce vrstvy zpracovávaného materiálu nacházejícího pod povrchem řezání. Síly na zadní ploše jsou jakoby parazitním zatížením.

Moderní věda o řezání nevěnuje dostatečnou pozornost výzkumu sil na hřbetu, a právě dnes, kdy objem obrábění na čisto v technologických operacích, kde se řezání provádí v malých hloubkách, již několikrát převyšuje počet operací na černo. Síly působící na hřbet řezného elementu jsou malé ve srovnání se silami působícími na jeho čelo, když opotřebení řezného elementu není velké (do 0,1 mm) a když seříznutá vrstva není příliš tenká (více než 0,1 mm).

Proto se ze začátku může zdát, že se o vůbec výzkum sil na hřbetu jeví jen teoretický zájem. Jenže je třeba brát zřetel, že nástroj často pracuje při značném opotřebení a že mnoho řezných nástrojů pracují s dost malými hloubkami seříznuté vrstvy (protahovače, roztáčecí kleště, frézy, mikrofrézy atd.). Proto výzkum sil působících na hřbetu řezného elementu jeví nejen teoretický, nýbrž praktický zájem.

Studium sil na zadní ploše má velký praktický význam v mikrořezání, kde tloušťky seříznuté vrstvy jsou malé (0,005 až 0,2 mm), a nástroj pracuje s opotřebením $VB = 0,03$ až 0,5 mm. Jedním z příkladů praktického použití vědomostí o silách řezání na hřbetu může sloužit upřesnění výpočtu osového nástroje při mikrofrézování, kde poloměr osového nástroje je jenom 0,05 až 0,3 mm a nástroje má sníženou tuhost. Přesný výpočet a upřesněná analýza rozvahy sil působících v procesu řezání s ohledem na pasivní síly jsou nutné v adaptivních systémech řízení CNC strojů při obrábění malých, netuhých a složitých profilových detailů.

Při tom neexistují pomůcky, metodiky a zařízení, které dovolují přímým způsobem provést změření pasivních sil.

Výroba takových požadovaných dnes mikronástrojů pro obrábění, mikrodetailů není možné bez znalosti o pasivních silách, studia metodik jejich měření, porozumění mechanismu opotřebení nástroje na hřbetu a porozumění procesů odehrávajících se na hřbetu nástroje.

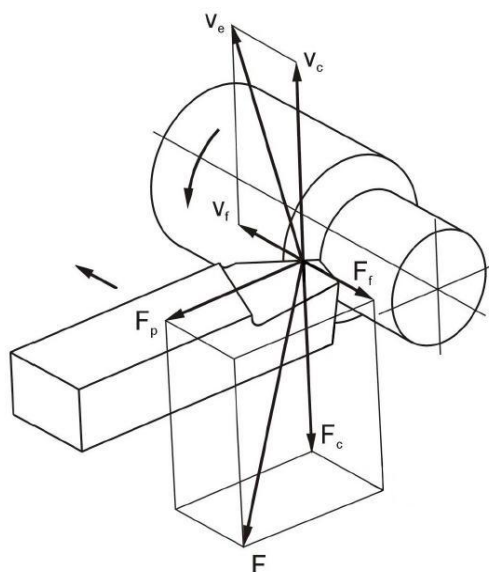
Tato diplomová práce se věnuje některým otázkám spojenými s procesy odehrávajících se na hřbetu.

1. Teoretická část.

1.1. Řezné síly při obrábění.

V souladu s energetickou rovnováhou procesu řezání, energie, kterou při obrábění dodáváme, je využita na sílové působení nástroje materiálu obrobku, při kterém musíme překonat odpor obrobku.

Na obr. 1 je uvedeno obecné schéma sil při obrábění soustružnickým nožem.



Obr. č. 1. Složky řezné síly při soustružení.

F_c - řezná síla

F_f - posuvová síla

F_p - pasivní síla

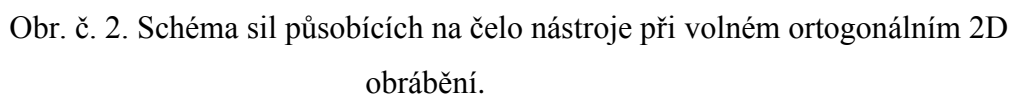
F - výsledná řezná síla

V_c - řezná rychlost

V_f - rychlost posuvu

V_e - rychlost výsledného řezného pohybu. [1], [4].

V případě dokonalého (teoretického) volného ortogonálního 2D obrábění, kdy se předpokládá, že nástroj pracuje bez nárůstku a nemá opotřebení, tříska se dotýká nástroje jen na čele. [2]



F_p – pasivní (posuvová) složka řezné síly

 F_t – třecí síla na čele nástroje

F_N – normálová složka síly na čele nástroje

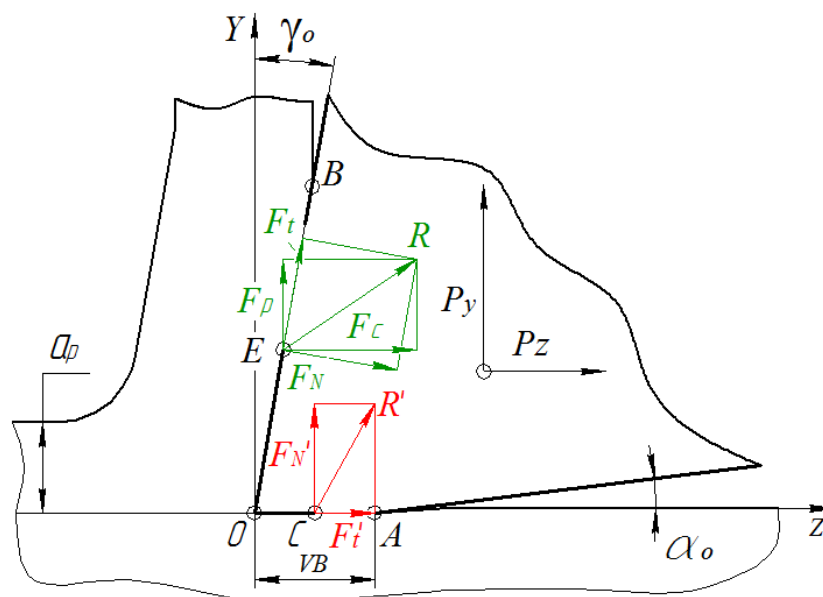
γ_o - nástrojový úhel čela ortogonální

α_o - nástrojový úhel hřbetu ortogonální

a_p – hloubka záběru [5].

Ale to je teoretický model. V praxi však nástroj pracuje bez nárůstu a opotřebení je prvním momentem na začátku řezání. Dále dochází ke vzniku nárůstu a postupnému zvětšení hodnoty opotřebení.

V případě ortogonálního 2D obrábění v praxi nástroj pracuje s opotřebením a kontakt vzniká nejen mezi třískou a čelem, ale i hřbetem nástroje a obrobkem.



Obr. č. 3. Schéma sil působících na hřbet a čelo nástroje při volném ortogonálním 2D obrábění v praxi.

F_c, F_p, R, F_t, F_N – síly na čele řezného nástroje

F_t', F_N', R' – síly na hřbetu řezného nástroje

P_y, P_z – složky výsledné řezné síly

VB – šířka opotřebení na hřbetu nástroje

γ_o - nástrojový úhel čela ortogonální

α_o - nástrojový úhel hřbetu ortogonální

a_p – hloubka záběru [2].

V tomto případě, během práce nástroje síla F_N je výslednicí normálních tlaků na povrchu kontaktu třísky a čela řezného nástroje. Síla F_N' je výslednicí normálních tlaků na povrchu kontaktu třísky a hřbetu nástroje.

1.2. Řezné síly na hřbetu řezných nástrojů.

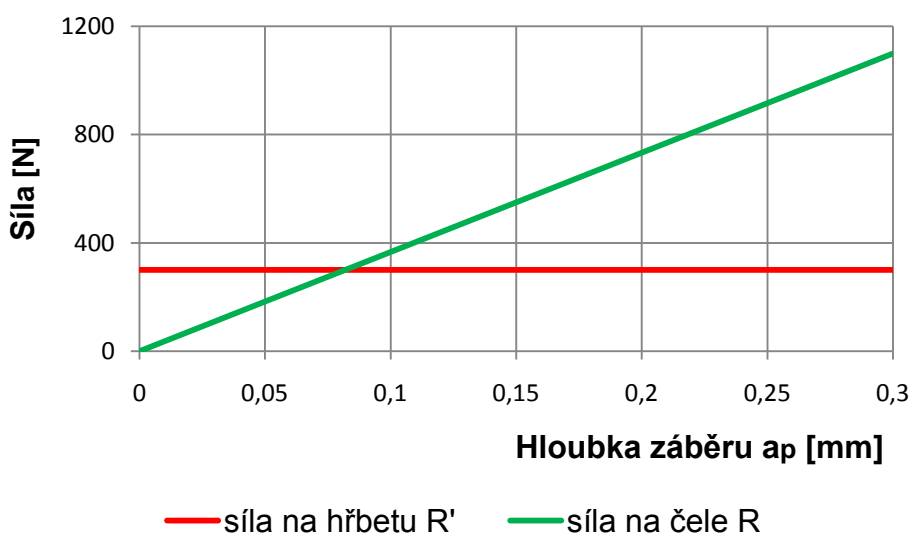
Za nepřítomnosti nárůstku je řezný element, který je v kontaktu se zpracovávaným materiálem nejenom na čele, ale i na hřbetu. Na každé z těchto ploch vznikají síly, které hrají různou roli v procesu řezání.

Síly působící na čele zajišťují proces tvorby třísky. Síly působící na hřbetu se neúčastní procesu tvorby třísky a vznikají v důsledku pružné reakce vrstvy zpracovávaného materiálu nacházejícího pod povrchem řezání. Tak síly na hřbetu jsou jakoby parazitickou zátěží na nůž.

Podle změny sil na hřbetech lze soudit o vlivu různých faktorů na podmínky kontaktu hřbetu řezného nástroje se zpracovávaným materiálem. Zákonitosti měření sil na hřbetu se hodně liší od těch zákonitostí, kterým se podřizují měření sil na čele. Většinu faktorů v procesu řezání různě ovlivňují síly působící na hřbetu a na čele nástroje. Proto zákonitosti měření sil na hřbetu potřebují zvláštní zkoumání.

Síly působící na čele a na hřbetu řezného elementu se liší podle hodnoty a směru. Zpravidla síly na hřbetu jsou malé ve srovnání se silami na čele. Proto při zkoumání rovnováhy sil působících v procesu řezání lze často zanedbávat síly na hřbetu. Nicméně, v řadě případů síly na hřbetech mohou být velké a občas dokonce převyšovat síly na čele. V takových případech ani přibližná analýza rovnováhy sil působících v procesu řezání není možná bez přihlédnutí k silám na hřbetu.

Profesor Zorjev při zkoumání sil na hřbetu určil, že síly na čele a na hřbetu jsou srovnatelné v hloubce řezání s hodnotou méně než 0,3 mm. [2]



Graf č.1. Závislosti hodnot síly na hřbetu a hodnot síly na čele nástroje podle hloubky řezání.

Na tomto grafu sestaveném dle knihy profesora Zorjeva [2] je vidět, že hodnota síly řezání na hřbetu ve hloubce od 0 do 0,1 mm převyšuje hodnotu síly řezání na čele, a na hloubce seříznuté vrstvy od 0,1 mm do 0,3 mm, hodnotu síly řezání na hřbetu tvoří od 100 do 30 % z hodnoty síly řezání na čele.

Při práci nástroje s hloubkou řezání méně než 0,3 mm, zanedbání výpočtu sil řezání na hřbetu při výpočtu souhrnné rovnováhy sil řezání vede k seriózním chybám.

Základním druhem obrábění, kde nástroj pracuje s hloubkou od 0,001 do 0,2

mm, je mikroobrábění.

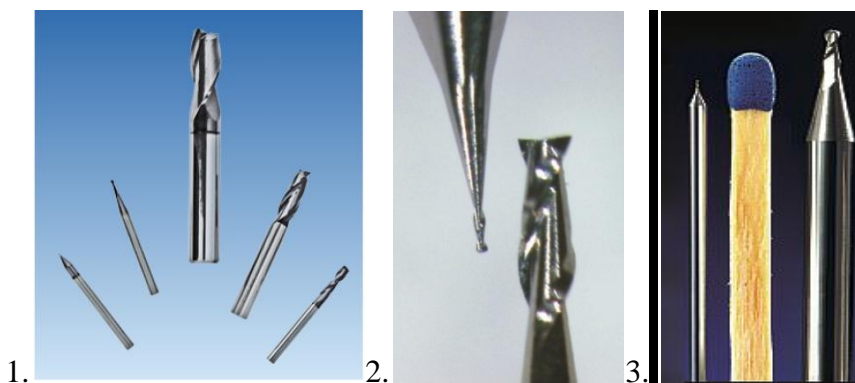
1.3. Mikroobrábění.

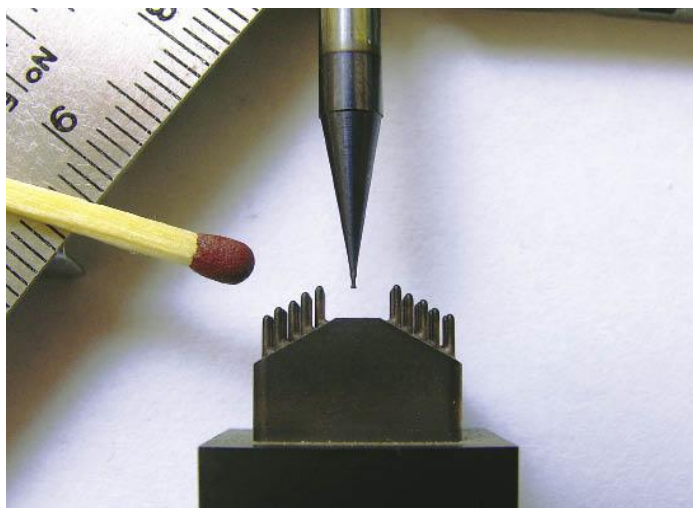
Za posledních pět let trh mikrodetailů a mikrokomponent se rozvíjí nejdynamicky, předvádějící silná tempa růstu: když v roce 2000 jeho objem tvořil cca 30 miliard dolarů, v roce 2005 dosáhl 60 miliard dolarů, a v roce 2011 dosáhne cca 120 miliard dolarů.[3] Výhody mikrotechnických výrobků jsou zjevné: zvýšená funkční přesnost, menší váha prvku nebo uzlu ovládajících při tom vyššími provozními schopnostmi.

Mikrotechnologie se považují dnes jako klíčové technologie s ekonomickým potenciálem srovnatelným s mikroelektronikou. V souladu s výsledky marketingových výzkumů zejména aktivně tyto technologie se rozvíjí v USA, Japonsku a Německu. V USA, kde je hodně vyvinutá mikroelektronika, obzvlášť se rozvíjí výroba součástek na základě mikrosystému. V Německu velkého rozvoje dosáhly aplikované směry a mikrotechnologie, zabudovávají se ve výrobní procesy pro zlevnění konečného výrobku a zlepšení jeho spotřebitelských vlastností. V Japonsku miniaturizace vždy byla prioritním směrem v rozvoji výroby, proto dnes prakticky v každé velké japonské společnosti existuje vědecká jednotka, které se zabývá problémy mikrotechnologie.

Mikroobrábění je druh obrábění lišící se od tradičního řezání tím, že obrábění se provádí s malými hloubkami 0,05 až 0,2 mm. Nejrozšířeným druhem mikroobrábění je mikrofrézování. Výrobci nástroje pro mikrofrézování nabízejí frézy, které mohou obrábět snadno barevné slitiny, tak i těžko obrábějící nerezové a žáruvzdorné ocele. Mikrofrézy od světových výrobců mívají různou geometrii, odlišný poloměr a s rozlišným množstvím zubů.

Zde je několik příkladů nástrojů pro mikrofrézování od světových výrobců.





4.

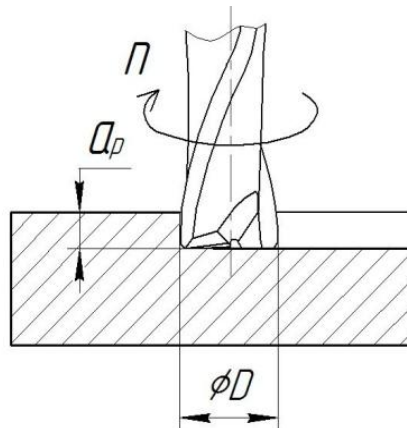


5.

Obr. č. 4. Mikrofrézy od různých světových výrobců.

Na Obr. č. 4. jsou zobrazeny mikrofrézy od různých světových výrobců:

1. Mikrofrézy od společnosti VHF (Německo) z jemnozrnné tvrdé slitiny s povlakem TiAlN, pro obrábění oceli zvýšené tuhosti. Minimální poloměr fréz $D_{\min} = 0,1\text{mm}$. [9]
2. Mikrofrézy od společnosti Minitex CNC (USA). Poloměr fréz $D = 0,0025$ až $0,2\text{ mm}$. [10]
3. Mikrofrézy od společnosti METAMASA (Indonesia). Minimální poloměr fréz $D_{\min} = 0,1\text{mm}$. [11]
4. Mikrofrézy od společnosti CIMATRON (USA). Minimální poloměr fréz $D_{\min} = 0,01\text{mm}$. [12]
5. Mikrofrézy od společnosti ALIKONTOOL (Česko). 2-břité mikrofrézy s krkem HRc62. Nástrojařské mikrofrézy speciální pro nástrojové ocele, kalené materiály, obecné ocele. Dlouhý krk pro hluboké obrábění blízko stěn. 5Z2, HRc62, 30ST, AlTiN, UWC. Minimální poloměr fréz $D_{\min} = 0,4\text{ mm}$. [13]



Obr. č. 5. Schéma mikrofrézování.

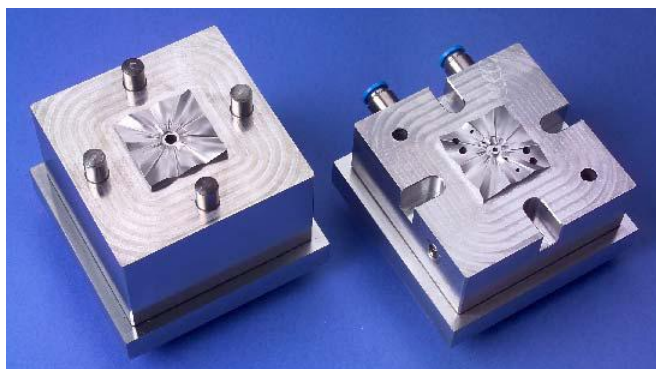
Odlišující vlastnosti mikrofrézování:

1. Poloměr nástroje je $D = 0,01$ až 3 mm.
2. Nástroj pracuje s hloubkou řezu $a_p = 0,001$ až $0,2$ mm.
3. Posuv na jeden zub $f_z = 0,0005$ až $0,01$ mm/zub.
4. Moderní stroje pro mikrofrézování dovolují pracovat s otáčkami za minutu $n = 200\,000\text{ min}^{-1}$.
5. Mikrofrézy pracují s rychlostmi $v = 10$ až 300 mm/min.
6. Mikrofrézy pracují s opotřebením.

Množství, kde se využívá operace mikrofrézování je velké. Letecký průmysl potřebuje miniaturní spojovací materiál, spojovací tvarovky a snímače, přístroje pro kontrolu proudu vzduchu a tekutin. V automobilovém průmyslu je docela reálné použití velmi malých elektromotorů a výkonných orgánů pro bezpečnostní systémy, zabezpečení pohodlí řidiče atd. Ve složitých systémech vstřiku paliva a jejich elementech mikročásti nacházejí také své použití.

Nejvíce mikrodetailů a mikrokomponent získaných v důsledku mikrofrézování jsou rozšířeny v lékařské a biomolekulární technice a elektronice. Je zjevná potřeba podobných součástí i v zdravotnictví, kde na jejich velikostech často závisí možnost provedení operace a doba uzdravení pacientů.

Příkladem může sloužit obrábění mikrofrézováním lisovacího nástroje pro vstřikování ve výrobě plastového mikrorotoru využívaného v lékařských přístrojích.[3]

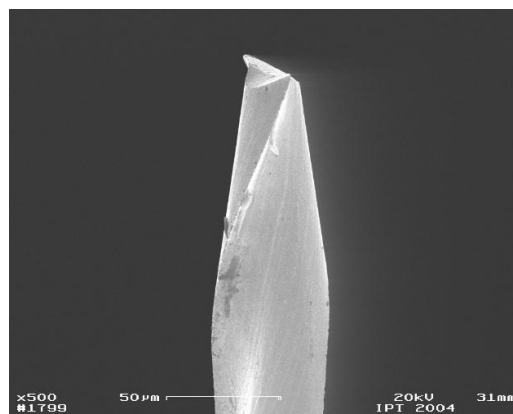


Obr. č. 6. Tvar pro mikrorotor po obrábění.

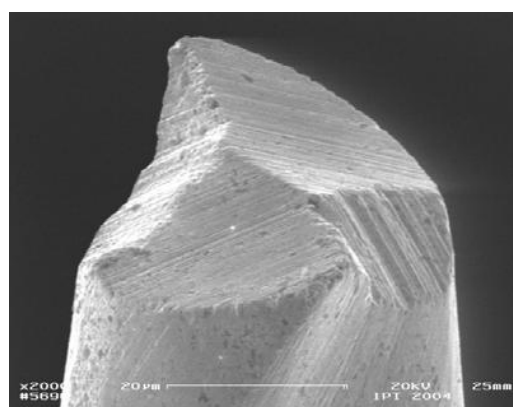
Požadavky na obrábění:

1. Přesnost obrábění: $< 5 \mu\text{m}$
2. Drsnost povrchu (R_a): $< 0,2 \mu\text{m}$

Pro obrábění byl použit nástroj společnosti MAGAFOR se speciální formou hřbetu pro zlepšení vlastností povrchu po obrábění.



Obr. č. 7. Nástroj mikrofrezování (Magafor).



Obr. č. 8. Speciální forma hřbetu nástroje (Magafor).

Obrábění se provádělo na speciálním stroji pro mikrofrezování společnosti KERN. Frekvence otáčení činila $160\,000 \text{ min}^{-1}$. Poloměr mikrofrezý činil $0,05 \text{ mm}$. Vztah délky nástroje k poloměru byl $L/D = 10$.

1.4. Řezné síly na hřbetu při mikroobrábění.

Výborné vlastnosti mikroobrábění jako druh třískového obrábění:

1. Nástroj při mikroobrábění pracuje s malými tloušťkami řezu a vždy má opotřebení.
2. Při mikrofrézování vztah délky nástroje a poloměru se rovná 10 a více, což vypovídá o snížené tuhosti osového nástroje.
3. K prvkům se uplatňují vysoké nároky na přesnost a čistotu povrchu.
4. V případě poruchy nástroje dojde k poškození obráběného prvku, což je nepřijatelné.

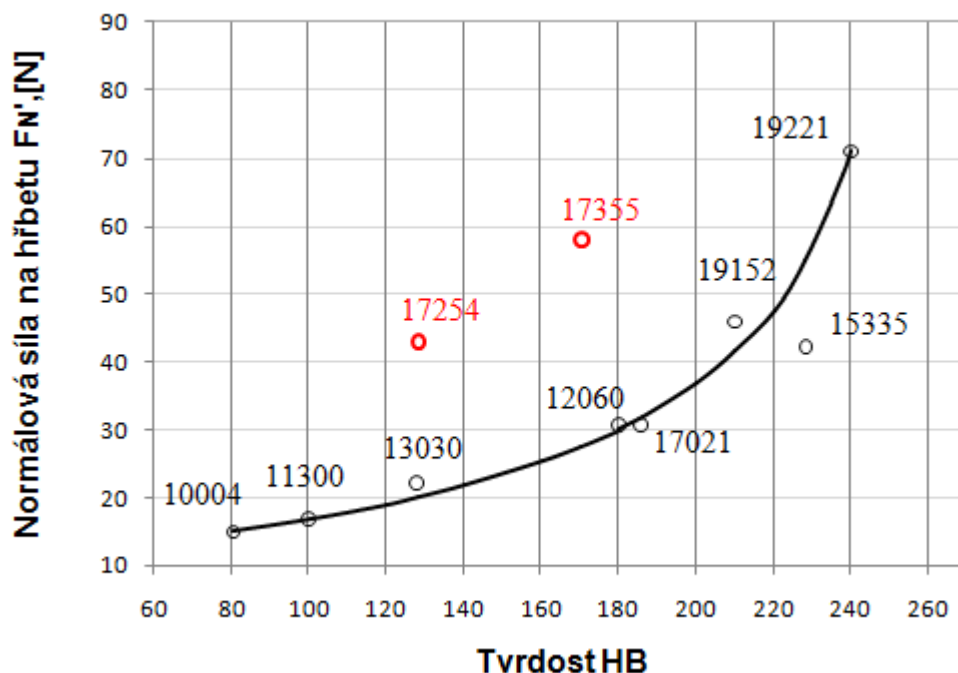
Při konstruování a výpočtích mikronástroje disponujícího nízkou tuhostí nutno brát v úvahu hodnotu sil na hřbetu řezného nástroje v rovnováze sil řezání, kde často jejich hodnoty jsou srovnatelné, a občas i převyšují hodnoty sil na čele. Přesný výpočet a měření sil řezání dovoluje zvýšit spolehlivost nástroje pro mikroobrábění na stádiu konstruování.

Výroba mikronástrojů a obrábění mikročásti není možná bez použití znalostí sil na hřbetu, bez metodik jejich měření a porozumění procesů vznikajících na hřbetu nástroje.

1.5. Shrnutí poznatků o řezných silách při obrábění.

Zkoumáním sil na hřbetu řezného nástroje se zabývali následující badatelé: Přílryl Z., Musilková R., Neckář F., Kvasnička I., Zorěv N. [8]

V roce 1956 profesor Zorěv publikoval knihu „Otázky mechaniky řezání kovů“, ve které v průběhu zkoumání nabídl urychlenou metodu pro určení sil na hřbetu v závislosti na tuhosti obráběného kovu. Získaný graf byl předložen v dané knize. [2]



Graf č.2. Urychlená metoda určení normálové složky síly na hřbetu v závislosti na tuhosti obráběného materiálu. [2]

Zorěv provedl zkoumání pro různé typy ocele. Byly zkoumány nelegované konstrukční ocele, legované ocele, nástrojové ocele a nerezové ocele.

Jak je vidět na grafu, všechny body sílových hodnot na hřbetech pro ocele se umístily na grafu s výjimkou bodů hodnot austenitových nerezových oceli. Toto i stalo cílem této diplomové práce.

Cílem zkoumání v rámci diplomové práce bude předložení nové urychlené metody pro určení síl na hřbetu pro všechny druhy obráběných materiálů.

1.6. Metody měření síl na hřbetu.

Metody urychleného určení síl na hřbetu není možné předložit bez znalostí metod měření síl na hřbetu. Na rozdíl od síl na čele, pro měření síl na hřbetu přímé způsoby neexistují.

V průběhu zkoumání síl na hřbetu bylo vytvořeno několik metodik dovolujících získat hodnoty těchto síl. Zde jsou základní:

1. Způsob měření tloušťky seříznuté vrstvy (způsob extrapolace na nulovou tloušťku).
2. Způsob volby předního uhlu.
3. Způsob porovnání síl řezání při různých opotřebeníh.

4. Způsob kosoúhlého řezání.
5. Způsob rozřezávacího nože. [3]

1.6.1. Měření síly řezání na hřbetu metodou změny tloušťky seříznuté vrstvy. (Způsob extrapolace na nulovou tloušťku).

Podstata metody spočívá v tom, že po získání několik hodnot souhrnné síly řezu při řezání s různými tloušťkami, získané hodnoty jsou extrapolovány na nulovou tloušťku. Tato síla získaná během extrapolace bude silou na hřbetu.

Na obr. č. 7 zobrazeno čelo rezného nástroje OB, na kterou působí normalová síla F_N a tangenciální síla F_t , jejichž součet je výslednice R . Na zadním povrchu OA působí normálová síla F_N' a tangenciální síla F_t' , jejichž součet je výslednice R' . Součet sil R a R' je síla řezání P , projekce které na ose Z a Y bude příčně P_z a P_y .

$$P_y = F_p + F_N'$$

$$P_z = F_c + F_t'$$

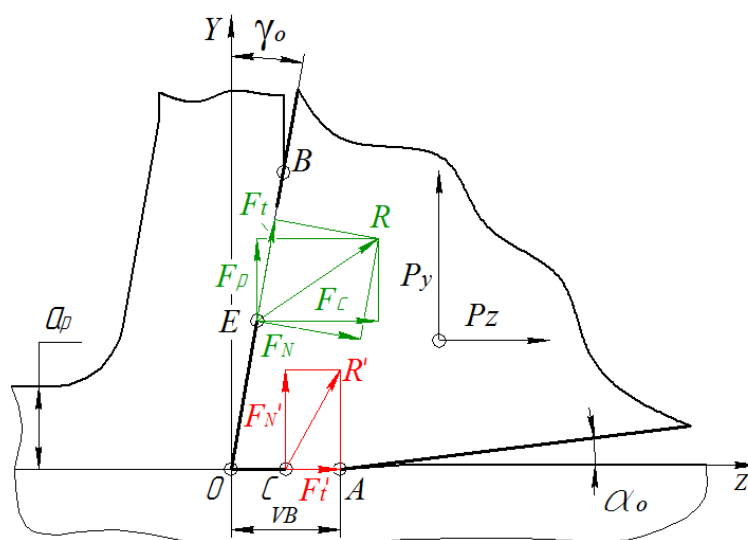
F_p , F_c - projekce síly R na ose Y a Z , nebo svislá a vodorovná projekce síly působící na předním povrchu. (Obr. č. 7)

Síla řezání na čele R se snižuje při poklesu tloušťky seříznuté vrstvy. Také síly F_p a F_c , F_t a F_N se budou ubývat s poklesem tloušťky seříznuté vrstvy.

Při poklesu tloušťky seříznuté vrstvy do nuly platí následující tvrzení:

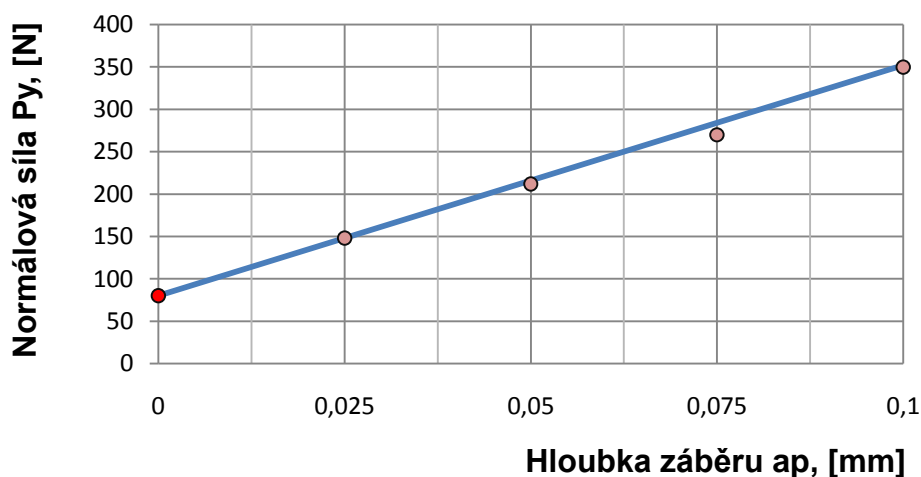
$$P_{z \text{ } OA \rightarrow 0} = F_t'$$

$$P_{y \text{ } OA \rightarrow 0} = F_N'$$



Obr. č. 7. Schéma sil působících na hřbet a čelo nástroje při volném ortogonálním 2D obrábění.

Takto, extrapolující experimentálně získané hodnoty svislé a vodorovné výslednice řezání při různých hodnotách tloušťky řezu, lze najít svislou a vodorovnou výslednici na hřbetu řezného nástroje.



Graf č.2. Určení svislé projekce síly řezu na hřbetu metodou změny tloušťky.

Na Grafu č. 2 zobrazen příklad určení svislé výslednice řezání na hřbetu F_N' metodou změny tloušťky seříznuté vrstvy (metodou extrapolace). Provedli se měření obecné svislé výslednice řezání v různých tloušťkách řezu $a_p = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1$. Při spojení získaných sílových hodnot v odpovídajících tloušťkách přímkou a při kreslení této přímky do protínání s osou (červený bod) získáme hledanou hodnotu svislé výslednice řezu na hřbetu pro dané podmínky řezání obráběného materiálu.

1.6.2. Měření síly na hřbetu metodou volby předního úhlu.

Podstata metody je v tom, že pro určení normálové síly na hřbetu se musí vybrat taková hodnota předního úhlu γ_o , při které vodorovná projekce síly řezání P_y zůstává konstantní při změně tloušťky řezu ($P_y = F_N'$). Právě tato konstantní hodnota se bude rovnat normálové síle na hřbetu. Matematický důkaz správnosti dané metody je uveden dále.

$$P_y = F_t \cos \gamma_o - F_N \sin \gamma_o + F_N'$$

$$P_y = F_N'$$

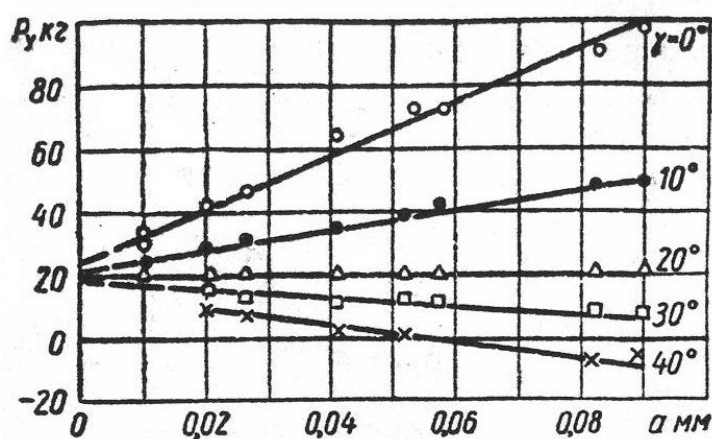
$$F_t \cos \gamma_o - F_N \sin \gamma_o = 0$$

$\operatorname{tg} \gamma_o = \mu$, μ - koeficient tření na čele.

$$F'_t = F'_N \mu$$

$$F'_t = F'_N \operatorname{tg} \gamma_o$$

Na Obr. č. 8 zobrazen příklad určení svislé výslednice řezání F'_N na hřbetu metodou volby předního úhlu při volném řezu ocele 12050.1 s vodou. Rychlost řezu $V = 0,7$ m/min, šířka řezu $b = 10$ mm. Byly použity nože s ploškou opotřebení zadní strany $VB = 0,03$ mm.



Obr. č. 8. Určení svislé projekce síly řezu na hřbetu metodou volby předního úhlu.

Při $\gamma_o = 20^\circ$, síla P_y se nemění při zvýšení tloušťky seříznuté vrstvy 9 krát. Síla na čele se musela zvýšit skoro stejně tolikrát. To znamená, že podmínka $\operatorname{tg} \gamma_o = \mu$ se uskutečňuje při $\gamma_o = 20^\circ$, a $P_y = F'_N$. Při $\gamma_o = 20^\circ$, $P_y = 20$ N, tak $F'_N = 20$ N.

$$F'_t = F'_N \operatorname{tg} \gamma_o$$

$$F'_t = 20 \operatorname{tg} 20^\circ = 7 \text{ N}$$

Tangenciální síla na hřbetu $F'_t = 7$ N.

1.6.3. Měření síly řezu na hřbetu metodou srovnání sil, řezání při různých opotřebeníh zadní plochy.

Metoda srovnání sil řezu při různých opotřebeníh zadní plochy je založena na tom, že zvýšení hodnoty opotřebení na hřbetu VB vede k zvýšení výsledné síly řezání P díky zvýšení síly řezání na hřbetu R' , přičemž se hodnota síly řezání na čele R nemění.

$$\Delta P = \Delta R'$$

$$\Delta P_y = \Delta R_y' = \Delta F_N'$$

$$\Delta P_z = \Delta R_z' = \Delta F_t'$$

Hodnota síly na hřbetu R' je přímo proporcionální hodnotě opotřebení nástroje na hřbetu VB . Vztah hodnoty síly na hřbetu řezného nástroje R' a hodnoty opotřebení na hřbetu VB se rovná přírůstku hodnoty síly na hřbetu $\Delta R'$ k přírůstku hodnoty opotřebení na hřbetu ΔVB .

$$\frac{R'}{VB} = \frac{\Delta R'}{\Delta VB}$$

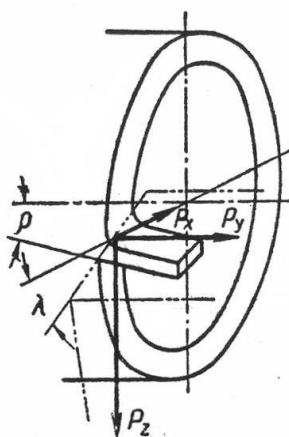
$$\Delta F_N' = \Delta R_y' \frac{VB}{\Delta VB}$$

$$\Delta F_t' = \Delta R_z' \frac{VB}{\Delta VB}$$

Pro získání hodnot projekce sil řezání na hřbetu stačí změřit dynamometrem projekce výsledné síly řezu při dvou různých opotřebeních zadní plochy nástroje.

1.6.4. Měření síly řezání na hřbetu metodou kosoúhlého řezu.

Kosoúhlý volný řez se uskutečňuje pomocí čelního soustružení trubice. Schéma tohoto soustružení je zobrazen na obr. č. 9.



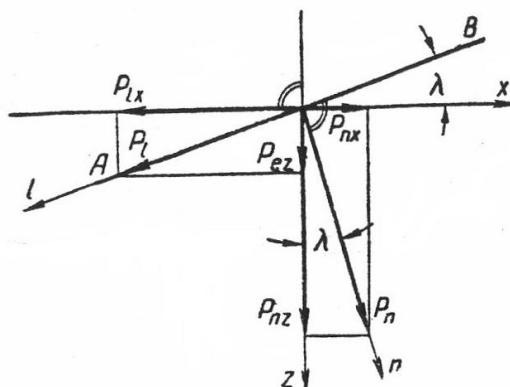
Obr. č. 9 Schéma kosoúhlého volného řezu při čelním soustružení trubice s podélným posuvem.

Na obr. č. 10 je zobrazeno obecné schéma sil v rovině řezu při kosoúhlém řezu. Pro určení sil na hřbetu dle výše uvedených vztahů je třeba změřit síly P_x, P_y, P_z pomocí dynamometru.

$$P_m = P_y$$

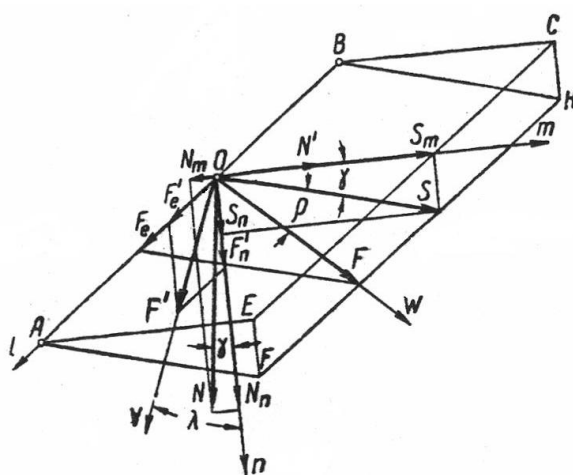
$$P_l = P_z \sin \lambda - P_x \sin \lambda$$

$$P_n = P_z \sin \lambda - P_x \sin \lambda$$



Obr. č. 10 Obecné schéma sil v rovině řezu při kosoúhlém volném řezu.

Výklad podstaty metody kosoúhlého řezu požaduje prozkoumání rovnováhy sil při kosoúhlém řezu.



Obr. č.11 Schéma sil působících na čelo a hřbet nástroje při kosoúhlém řezu.

AB – pracovní úsek řezacího okraje

V – rychlost řezu

ω – rychlost třísky,

ρ – úhel vychýlení třísky.

Na základě schématu na obr. č. 9:

$$P_l = F \sin \rho + F' \sin \lambda$$

$$P_m = F \cos \rho \cos \gamma - N \sin \gamma + N'$$

$$P_n = N \cos \gamma + F \cos \rho \sin \gamma + F' \cos \lambda$$

Při opotřebení $VB = VB_1$, $P_{l1}, P_{m1}, P_{n1}, F_1', N_1'$.

Při opotřebení $VB = VB_2$, $P_{l2}, P_{m2}, P_{n2}, F_2', N_2'$.

$$VB = VB_1$$

$$P_{l1} = F \sin \rho + F_1' \sin \lambda$$

$$P_{m1} = F \cos \rho \cos \gamma - N \sin \gamma + N_1'$$

$$P_{n1} = N \cos \gamma + F \cos \rho \sin \gamma + F_1' \cos \lambda$$

$$VB = VB_1$$

$$P_{l2} = F \sin \rho + F_2' \sin \lambda$$

$$P_{m2} = F \cos \rho \cos \gamma - N \sin \gamma + N_2'$$

$$P_{n2} = N \cos \gamma + F \cos \rho \sin \gamma + F_2' \cos \lambda$$

Nalézáme síly řezání na hřbetu N_1', F_1' při VB_1 a N_2', F_2' při VB_2 :

$$N_1' = \frac{P_{m1} \cos \gamma + P_{n1} \sin \gamma - P_{l1} \operatorname{ctg} \rho}{\cos \gamma - \frac{P_{l2} - P_{l1}}{P_{m2} - P_{m1}} (\operatorname{ctg} \rho - \operatorname{ctg} \lambda \sin \gamma)}$$

$$N_2' = \frac{P_{m2} \cos \gamma + P_{n2} \sin \gamma - P_{l2} \operatorname{ctg} \rho}{\cos \gamma - \frac{P_{l2} - P_{l1}}{P_{m2} - P_{m1}} (\operatorname{ctg} \rho - \operatorname{ctg} \lambda \sin \gamma)}$$

$$F_1' = \frac{(P_{l2} - P_{l1}) N_1'}{(P_{m2} - P_{m1}) \sin \lambda}$$

$$F_2' = \frac{(P_{l2} - P_{l1}) N_2'}{(P_{m2} - P_{m1}) \sin \lambda}.$$

1.6.5. Měření síly řezání na hřbetu metodou rozřezávacího nože.

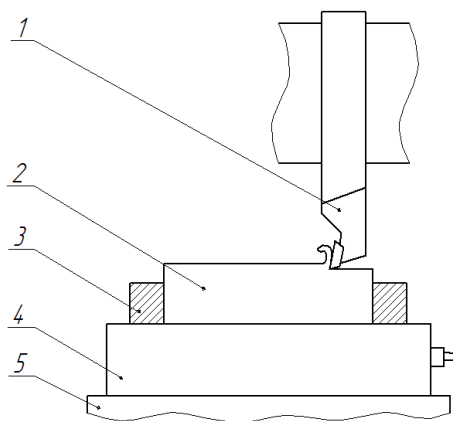
Pro měření sil řezání na hřbetu metodou rozřezávacího nože se používá speciální nůž pro volné řezání složený ze dvou částí. Horní část nože vykonává funkci přední plochy, spodní část nože – funkci zadní plochy. Pomocí dynamometru se měří ukazatele sil z každé plochy zvlášť.

Nedostatkem metody rozřezávacího nože je náročnost rozdělení nože na dvě nezávislé části tak, aby jedna z nich vnímala jen namáhání působící na přední ploše, druhá – jen namáhání působící na zadní ploše.

2. Navržení metodiky zkoumání sil na hřbetu řezných nástrojů v laboratoři KOM TUL.

2.1. Schéma experimentu.

Pro experiment určení sil na hřbetu řezného nástroje byla zvolena metoda změny tloušťky seříznuté vrstvy (metoda extrapolace na nulovou tloušťku). Pro určení výsledné svislé řezné síly F_N' na hřbetu nástroje, se musí změřit souhrnná svislá výslednice řezné síly P_y při různých tloušťkách třísky a při různě velkém opotřebení hřbetu nože. Měření se provádělo při hoblování. Schéma obrábění je uvedeno na obr. č.12.



Obr. č. 12. Schéma měření řezných sil na hřbetu metodou změny tloušťky třísky.
(Metoda extrapolace na nulovou tloušťku)

Označení na Obr. č. 12:

1. Hoblovací nůž.
2. Obrobek.
3. Svěrák.
4. Siloměr KISTLER.
5. Stůl hoblovky.

2.2. Realizace schématu měření v laboratoři KOM TUL.

Na obr. č. 13 je znázorněn způsob realizace schématu měření zobrazeného na obr. č. 12 na frézce FA – 18 v laboratoři KOM TUL [7], [14]



Obr. č. 13. Realizace schématu měření řezných sil na hřbetu metodou měření tloušťky seříznuté vrstvy (metoda extrapolace na nulovou tloušťku) na frézce FA -18 v laboratořích KOM TUL.

Frézka FA – 18 v laboratořích KOM TUL byla použita pro operace hoblování, během které se prováděli měření. Siloměr KISTLER byl upnut na stole frézky. Na siloměru KISTLER byl upevněn svěrák s obrobkem. Hoblovací nůž byl upevněn ve speciálním držáku stroje. Přisuv a posuv se prováděl manuálně, řezání se provádělo při automatickém cyklu s předepsanou rychlostí.



Obr. č. 14. Frézka FA – 18 v laboratořích KOM TUL.

2.3. Siloměr KISTLER.

Měření řezných sil se provádělo pomocí dynamometru KISTLER 9265B.[16] Před měřením byla provedena kalibrace KISTLERU (Obr. č. 16). Kalibrace byla provedena pomocí mechanického dynamometru a požadované opravné parametry byly vloženy do počítačového programu řízení měření MATLAB pro zvýšení přesností získávaných hodnot (obr. č. 16).



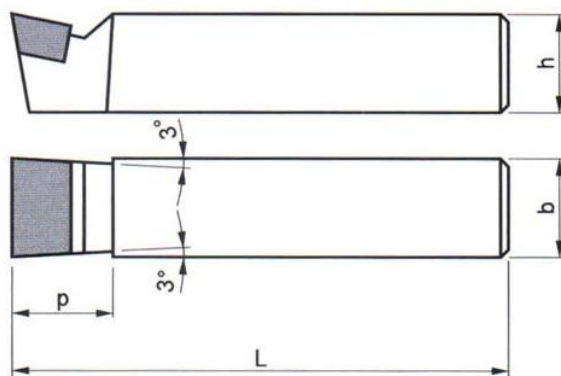
Obr. č. 15. Kalibrace měřicího přístroje KISTLER.



Obr. č. 16. Ovládací skříň KISTLER s počítačem.

2.4. Nože pro hoblování.

K obrábění se používal nabírací soustružnický nůž s připájenou břitovou destičkou. Břitová destička byla ze slinutého karbidu skupiny H10 bez povlaku. Úhly nože: $\gamma_o = 7^\circ$, $\alpha_o = 3^\circ$.



Obr. č. 18. Geometrie nabíracího soustružnického nože.

Na Obr. č. 18: $b = 10 \text{ mm}$

$h = 16 \text{ mm}$

$p = 16 \text{ mm}$

$L = 110 \text{ mm}$



Obr. č. 19. Nabírací soustružnický nůž.

2.5. Popis nástrojařské brusky.

Pro rozšíření experimentu měření řezných sil na hřbetu nože metodou měření tloušťky třísky bylo nutno provést řezání pomocí nožů s různými hodnotami opotřebení na hřbetu nože. Pro vytvoření opotřebení na hřbetu byla použita nástrojařská bruska EBN – 2C v laboratořích KOM TUL [15].

Hlavní technické parametry nástrojařské brusky EBN – 2C:

▪ Otáčky vřetene (vpravo, vlevo)	3800	$[\text{min}^{-1}]$
▪ Rozměry pracovního stolu	250 x 300	$[\text{mm}]$
▪ Vertikální zdvih pracovního stolu	75	$[\text{mm}]$
▪ Příčný posuv pracovního stolu	44	$[\text{mm}]$
▪ Celkový příkon stroje	4,6	$[\text{kW}]$



Obr. č. 20. Nástrojařská bruska EBN – 2C v laboratořích KOM TUL.

2.6. Nástrojová lupa Brinell

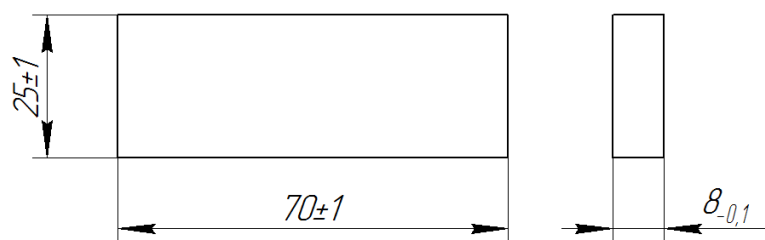
Opotřeбенí nabíracího soustružnického nože po broušení bylo měřeno nástrojovou lupou Brinell při dvacetičtyřnásobném zvětšení (24x) se stupnicí 0.05mm (obr. č. 21).



Obr. č. 21. Nástrojová lupa Brinell (zvětšení 24x) se stupnicí 0.05 mm.

2.7. Zkušební vzorky.

Pro provedení experimentu byly vybrány tři druhy materiálů s různou třídou obrobiteľnosti: slitina hliníku 42 4222 (AlZn6Mg2Cu), konstrukční ocel 12 050.1, ocel odolná proti korozi 17 240 (nerez) [6]. Z polotovaru byly vyfrézovány vzorky pro provedení experimentů. Rozměry vzorků byly u všech materiálů stejné. (obr. č. 22).



Obr. č. 22. Rozměry zkušebních vzorků.



Obr. č. 23. Zkušební vzorky.

3. Realizace zkoušky pro zjištění řezné síly metodou měření tloušťky třísky.

Pro určení svislé složky síly na hřbetu během experimentu v laboratořích KOM TUL byly naměřeny hodnoty svislé složky celkové síly řezání P_y při různých tloušťkách třísky a při různém opotřebení nože.

Zde je vidět, jaký vliv má tloušťka třísky, jakožto jedna z řezných podmínek, na velikost síly na hřbetu.

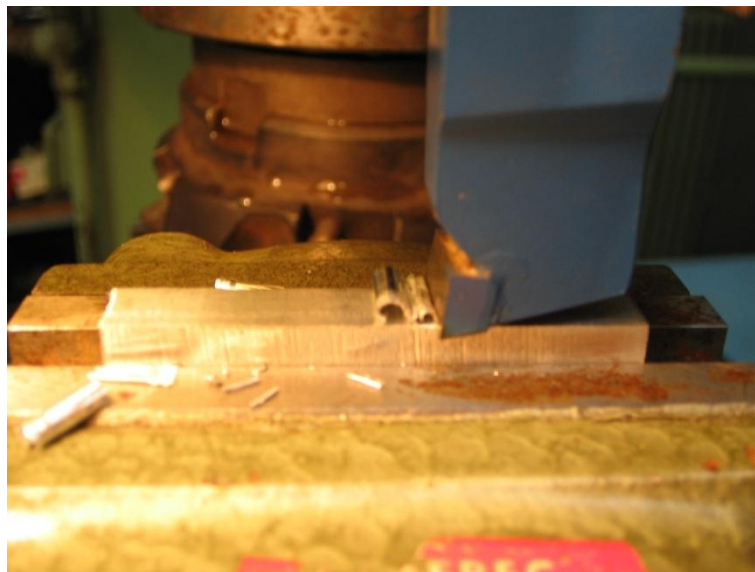
Podmínky experimentu:

- Obráběné materiály: slitina hliníku 42 4222 (AlZn6Mg2Cu), konstrukční ocel 12 050.1, ocel odolná proti korozi 17 240 (nerez).
- Obrábění se provádělo při tloušťkách třísky $a_p = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1$ mm.
- Šířka opotřebení nože na hřbetu $VB = 0,03; 0,15; 0,225; 0,035$ mm.
- Obrábění se provádělo s konstantní rychlostí $V = 450$ mm/min
- Jako chladicí kapalina byla použita voda.

Měření síly na hřbetu:

Pro dosažení jednoho bodu na grafu dle metody měření tloušťky třísky bylo provedeno 5 měření, což je dostatek pro získání referenční hodnoty.

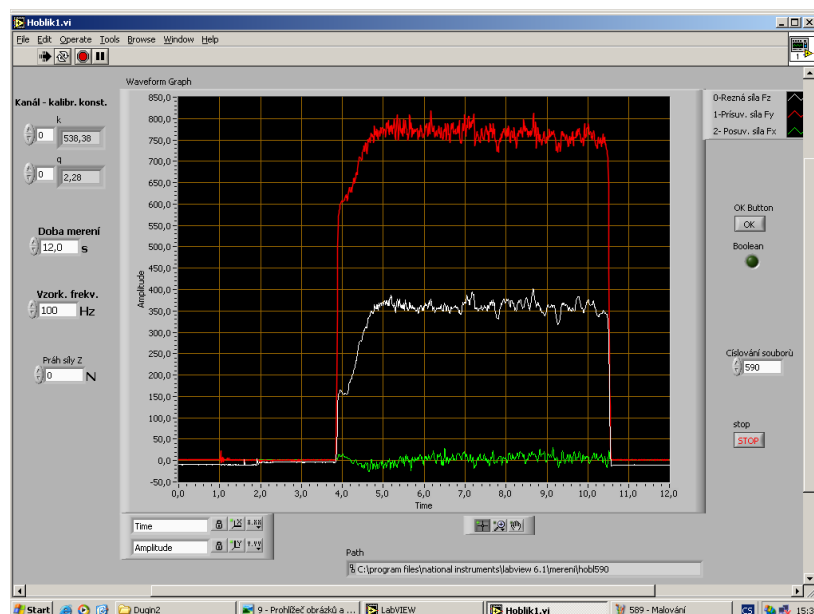
Na obr. č. 24 je detail hoblování, během kterého se provádělo měření svislé složky celkové řezné síly P_y .



Obr. č. 24. Proces měření svislé složky celkové řezné síly P_y .

Měření se zaznamenávali pomocí dynamometru KISTLER a výsledky se zobrazovaly na monitoru počítače v podobě grafu (obr. č. 25). Svislá složka celkové řezné síly P_y se zobrazovala v bílé barvě.

Veškeré hodnoty svislé složky celkové řezné síly P_y jsou v příloze č. 1. Svislá složková celkové řezné síly P_y je na monitoru počítače označena červenou barvou. (obr. č. 25).



Obr. č. 25. Měřená svislá složka celkové řezné síly P_y na monitoru počítače.

3.1. Výsledky experimentů.

Výsledky všech měření pro každý materiál byly uvedeny v tabulkách (Tab. č. 1, Tab. č. 2, Tab. č. 3).

Slitina hliníku 42 4222.

Hloubka záběru a_p .	VB = 0,03 mm		VB = 0,15 mm		VB = 0,225 mm		VB = 0,35 mm	
	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y
$a_p = 0,025$ mm	150	150	150	157	250	242	350	340
	145		165		230		375	
	150		165		240		325	
	155		150		250		325	
	150		155		240		325	
$a_p = 0,05$ mm	220	219	290	277	310	242	425	450
	215		275		330		475	
	215		265		325		450	
	225		275		325		450	
	220		280		325		450	
$a_p = 0,075$ mm	260	276	360	354	400	392	550	563
	280		360		380		570	
	270		360		400		550	
	270		350		400		570	
	300		340		390		575	
$a_p = 0,1$ mm	350	354	425	425	475	471	650	652
	350		425		460		620	
	370		430		470		650	
	350		420		475		660	
	350		425		475		680	

Tab. č. 1. Naměřené hodnoty svislé složky hlavní řezné síly P_y pro slitinu hliníku 42 4222.

Konstrukční ocel 12 050.1.

Hloubka záběru ap.	VB = 0,03 mm		VB = 0,15 mm		VB = 0,225 mm	
	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y
ap = 0,025 mm	370	379	570	629	640	647
	370		615		630	
	375		610		625	
	390		650		650	
	390		700		690	
ap = 0,05 mm	460	464	725	724	710	714
	450		700		710	
	470		740		710	
	460		730		720	
	480		725		720	
ap = 0,075 mm	600	630	890	898	1000	1000
	630		900		1000	
	620		910		1000	
	650		910		1000	
	650		880		1000	

Tab. č. 2. Naměřené hodnoty svislé složky hlavní řezné síly P_y pro konstrukční ocel 12 050.1.

Nerez 17 240.

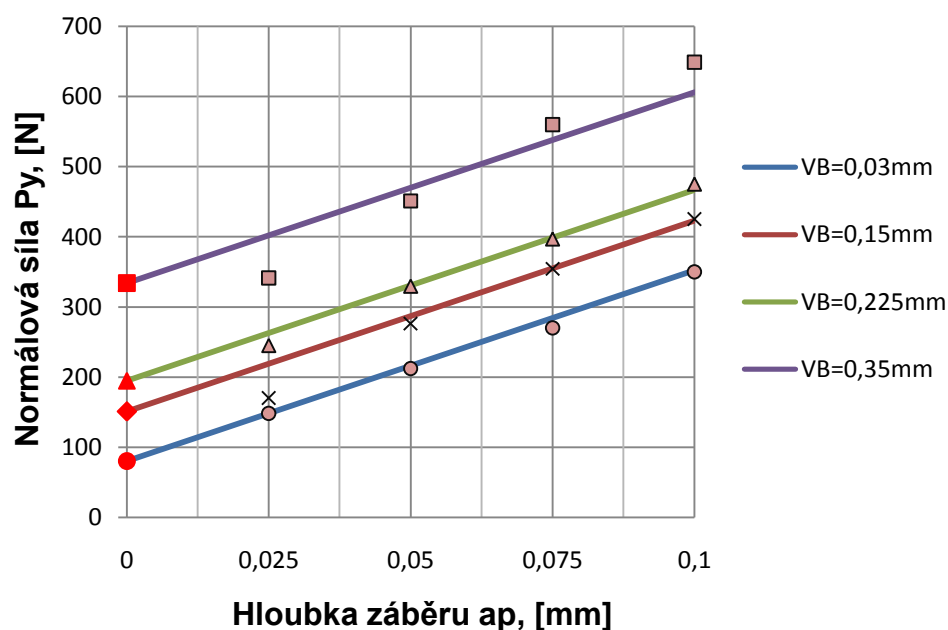
Hloubka záběru ap.	VB = 0,03 mm		VB = 0,35 mm	
	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y	$P_{y1} \dots P_{y5}$	\overline{P}_y
ap = 0,025 mm	750	930	1100	1060
	950		1020	
	930		1070	
	1000		1050	
	1000		1060	

ap = 0,05 mm	1100	1150	1250	1250
	1200		1250	
	1150		1300	
	1200		1200	
	1100		1250	
ap = 0,075 mm	1250	1375	1750	1534
	1500		1370	
	1350		1500	
	1400		1550	
	1375		1500	

Tab.č. 3. Naměřené hodnoty svislé složky hlavní řezné síly P_y pro Nerez 17 240.

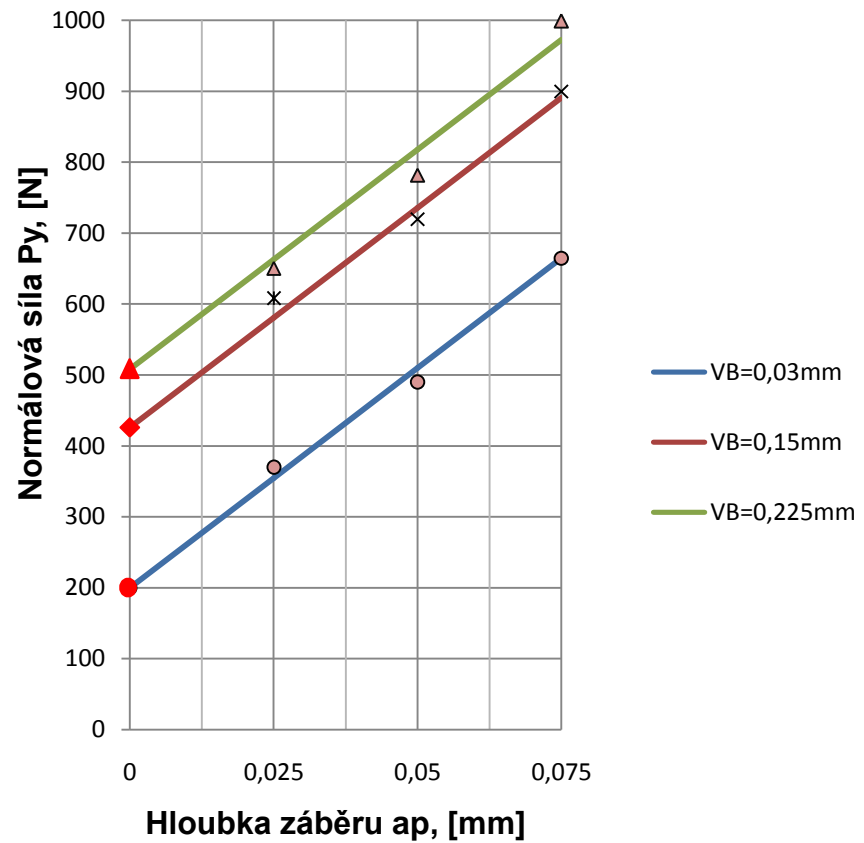
Na základě hodnot v modrých sloupcích byly pro každý materiál sestaveny grafy závislosti hodnot svislé složky hlavní řezné síly P_y na tloušťce třísky (Graf č.3, Graf č.4, Graf č.5). Graf byl extrapolován na osu, a získaná tečna byla hodnotou svislé složky řezné síly s nulovou tloušťkou, a to znamená, že je také silou na hřbetu F_N' .

Slitina hliníku 42 4222.

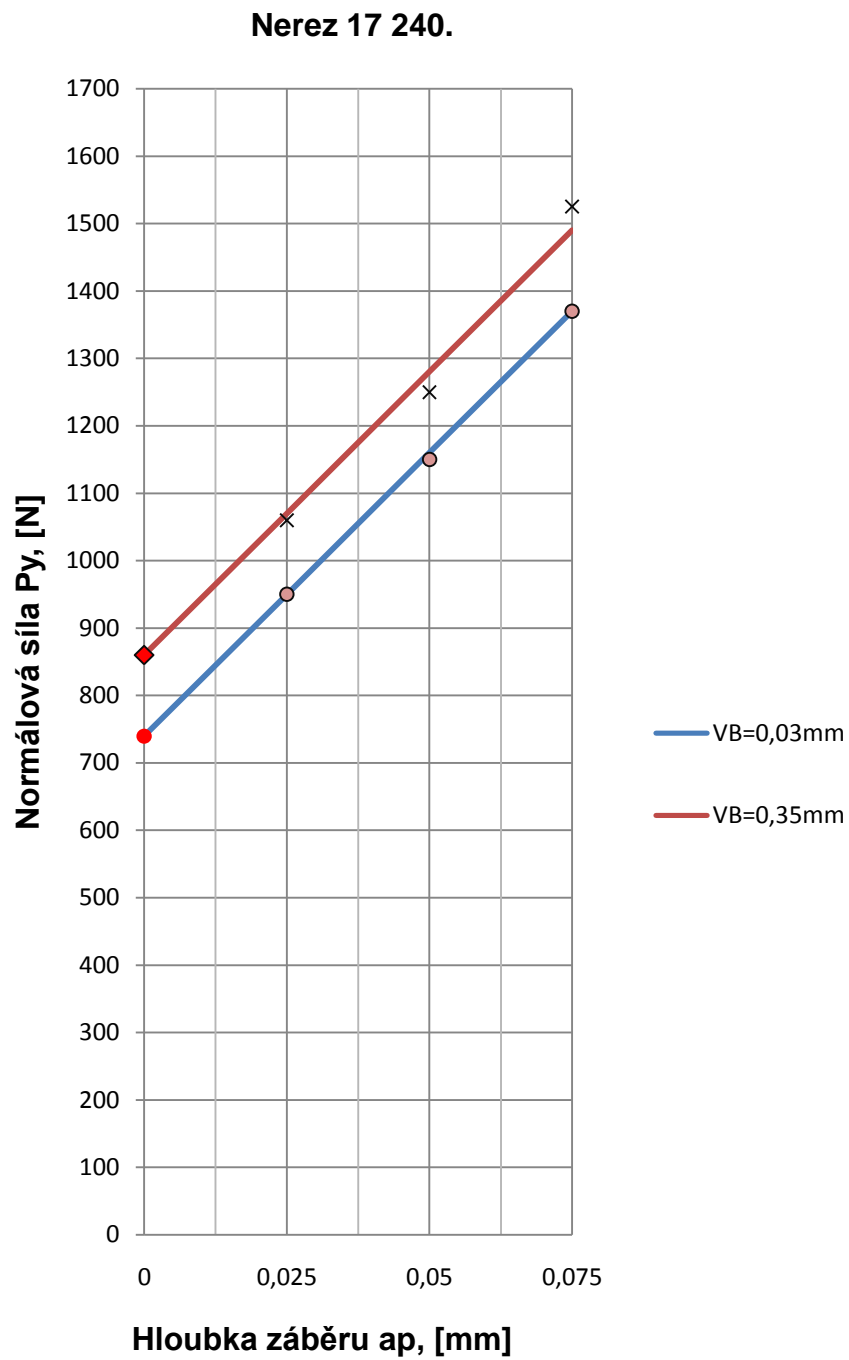


Graf č.3. Závislost hodnoty svislé složky hlavní řezné síly P_y na tloušťce třísky a_p při různých hodnotách opotřebení na hřbetu VB při obrábění slitiny hliníku 42 4222.

Konstrukční ocel 12 050.1.



Graf č.4. Závislost hodnoty svislé složky hlavní řezné síly P_y na tloušťce třísky a_p při různých hodnotách opotřebení na hřbetu VB při obrábění konstrukční ocele 12 050.1.



Graf č.5. Závislost hodnoty svislé složky hlavní řezné síly P_y na tloušťce třísky a_p při různých hodnotách opotřebení na hřbetu VB při obrábění Nerez oceli 17 240.

Na základě grafů je normálová složka řezné síly na hřbetu F_N' rovna:

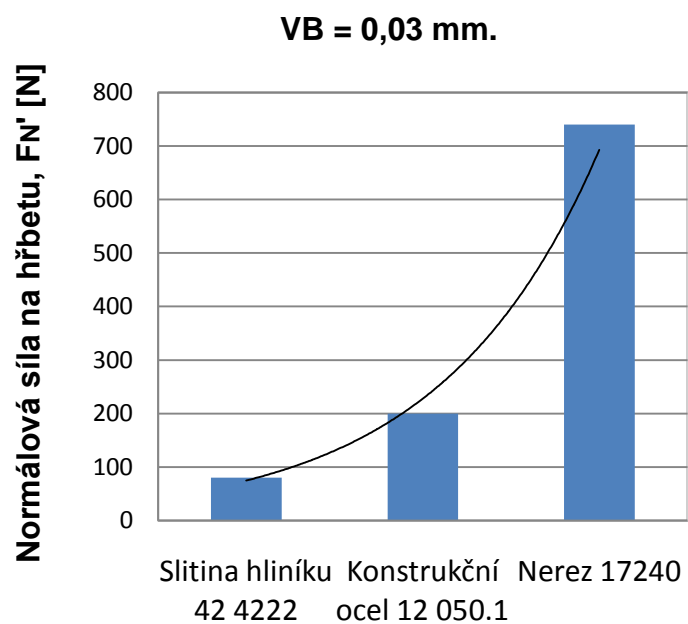
- Pro slitiny hliníku 42 4222 při opotřebení na hřbetu:
 - $VB = 0,03 \text{ mm}$, $F_N' = 80 \text{ N}$.
 - $VB = 0,15 \text{ mm}$, $F_N' = 151 \text{ N}$.
 - $VB = 0,225 \text{ mm}$, $F_N' = 194 \text{ N}$.
 - $VB = 0,35 \text{ mm}$, $F_N' = 334 \text{ N}$.
- Pro konstrukční ocel 12 050.1 při opotřebení na hřbetu:
 - $VB = 0,03 \text{ mm}$, $F_N' = 200 \text{ N}$.
 - $VB = 0,15 \text{ mm}$, $F_N' = 427 \text{ N}$.
 - $VB = 0,225 \text{ mm}$, $F_N' = 508 \text{ N}$.
- Pro nerez ocel 17 240 při opotřebení na hřbetu:
 - $VB = 0,03 \text{ mm}$, $F_N' = 740 \text{ N}$.
 - $VB = 0,35 \text{ mm}$, $F_N' = 863 \text{ N}$.

Závěr:

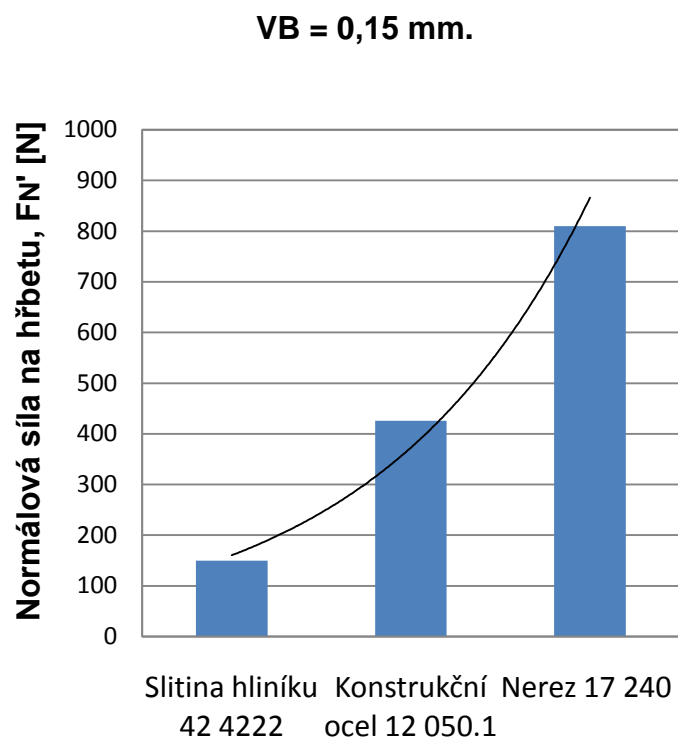
Během experimentů se prokázalo, že normálová složka řezné síly na hřbetu nástroje F_N' nezávisí na tloušťce třísky a_p . Tato síla zůstává konstantní svislou složkou celkové řezné síly P_y . Svislá složka celkové řezné síly P_y vzrůstá se zvýšením tloušťky třísky jen prostřednictvím nárůstu normálové řezné síly na čele F_p rostoucí se zvýšením tloušťky třísky.

3.2. Vliv obráběného materiálu na sílu na hřbetu.

Pro zjištění vlivu obráběného materiálu na sílu na hřbetu, byly sestaveny diagramy závislosti hodnot normálové složky řezné síly na hřbetu F_N' v závislosti na obráběném materiálu při stejné hodnotě opotřebení na hřbetu VB (Obr. č. 26, Obr. č. 27, Obr. č. 28).

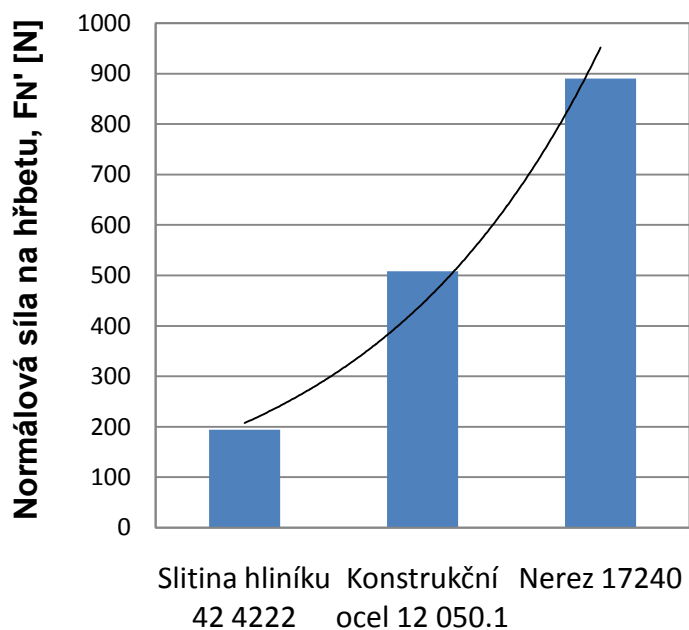


Obr. č. 26. Diagram závislosti hodnoty normálové složky řezné síly na hřbetu F_N' v závislosti na obráběném materiálu při stejné šířce opotřebení na hřbetu $VB = 0,03$ mm.



Obr. č. 27. Diagram závislosti hodnoty normálové složky řezné síly na hřbetu F_N' v závislosti na obráběném materiálu při šířce opotřebení na hřbetu $VB = 0,15$ mm.

VB=0,225 mm.



Obr. č. 28. Diagram závislosti hodnoty normálové složky řezné síly na hřbetu F_N' v závislosti na obráběném materiálu při šířce opotřebení na hřbetu $VB = 0,225$ mm.

Z diagramů je zřejmé, že hodnoty normálové složky řezné síly na hřbetu F_N' se hodně liší v závislosti na obráběném materiálu. Na základě těchto diagramů bylo vypočítáno tlakové napětí σ na hřbetu při obrábění různých metalů při různých šířkách opotřebení na hřbetu VB .

$$\sigma = \frac{F_N'}{A};$$

$$A = b \cdot VB;$$

$$\sigma = \frac{F_N'}{b \cdot VB};$$

σ - tlakové napětí,

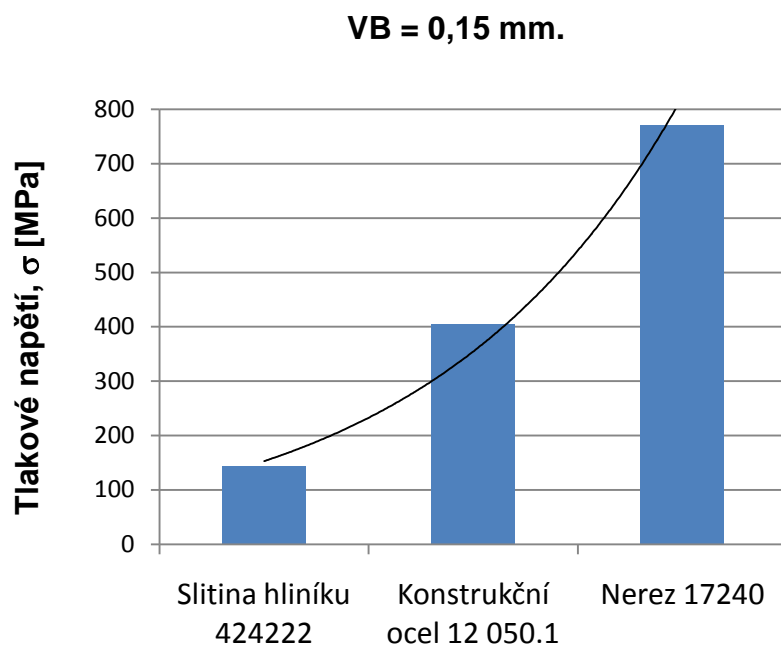
F_N' – normálová složka síly na hřbetu nástroje,

A – plocha styku,

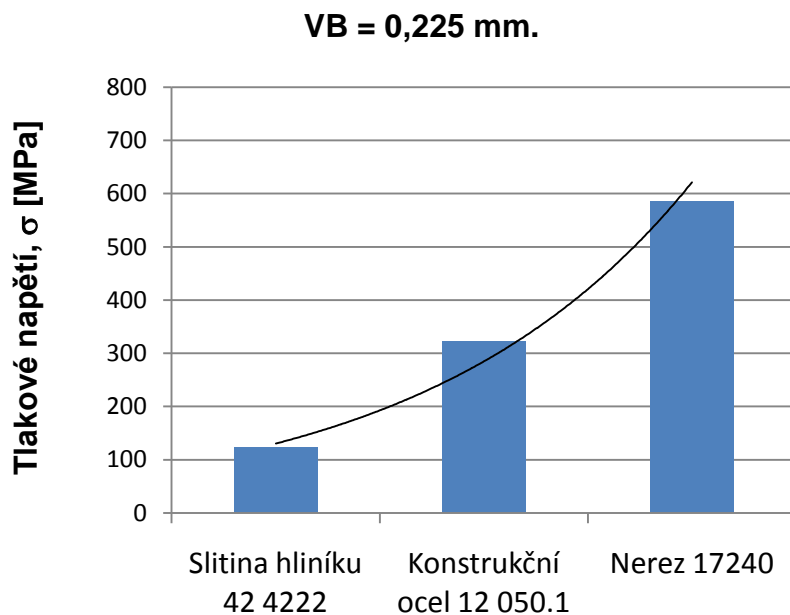
b – šířka řezu,

VB – šířka opotřebení na hřbetu nástrojů.

Dle rovnic uvedených výše byly vypočítány měrné hodnoty tlakového napětí (Obr. č. 29, Obr. č. 30).



Obr. č. 29. Závislost hodnoty tlakového napětí σ na hřbetu na obráběném materiálu při šířce opotřebení na hřbetu $VB = 0,15$ mm.



Obr. č. 30. Závislost hodnoty tlakového napětí σ na hřbetu od obráběného materiálu při šířce opotřebení na hřbetu $VB = 0,15$ mm.

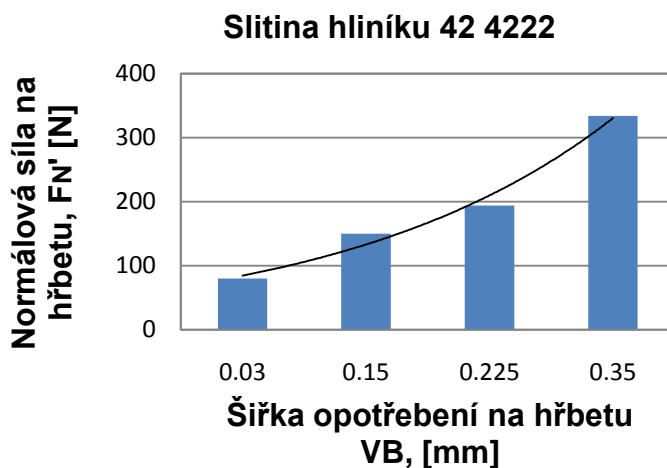
Závěr:

Během experimentů se dokázalo, že normálová řezná síla na hřbetu nástroje závisí na obráběném materiálu. Normálová řezná síla na hřbetu nástroje, tak i tlakové

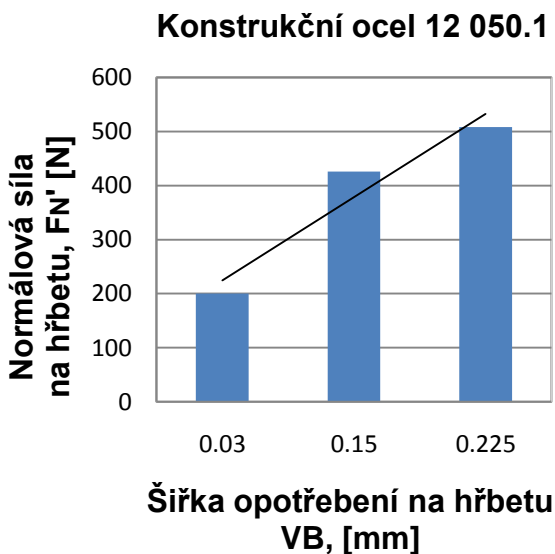
napětí na hřbetu je při obrábění nerez 17240 vyšší, než při obrábění konstrukční oceli 12 050.1 o 135 –160 %, a o 530 – 550 % vyšší, než u slitiny hliníku 42 4222. Tímto se vysvětluje zvýšené opotřebení nástroje na hřbetu při obrábění nerez vzhledem k obrábění oceli a slitiny hliníku.

3.3. Závislost síly na hřbetu na opotřebení nástroje na hřbetu.

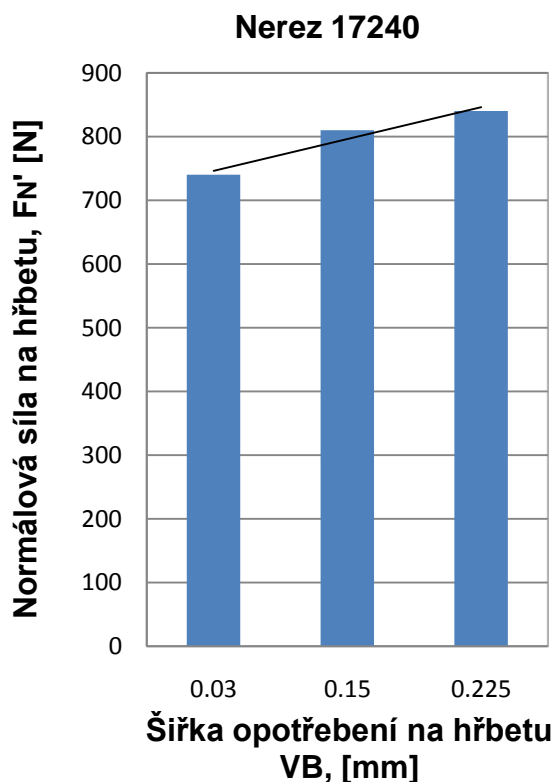
Během experimentu měření řezných sil na hřbetu metodou změny tloušťky třísky byly změřeny síly při různých šířkách opotřebení na hřbetu. Pro zjištění vlivu hodnoty opotřebení na hřbetu v závislosti na řezné síle na hřbetu byly sestaveny diagramy závislostí hodnot normálové složky řezné síly na hřbetu na hodnotě opotřebení na hřbetu (Obr. č. 31, Obr. č. 32, Obr. č. 33). Hodnoty sil na hřbetu pro chybějící hodnoty opotřebení byly získány metodou interpolace.



Obr. č. 31. Závislost hodnoty normálové složky síly na hřbetu F_n' na šířce opotřebení na hřbetu nástroje VB při obrábění slitiny hliníku 42 4222.



Obr. č. 32. Závislost hodnoty normálové složky síly na hřbetu F_N' na šířce opotřebení na hřbetu nástroje VB při obrábění konstrukční ocele 12 050.1



Obr. č. 33. Závislost hodnoty normálové složky síly na hřbetu F_N' na šířce opotřebení na hřbetu nástroje VB při obrábění Nereze 17240.

Závěr:

Během experimentů bylo potvrzeno, že normálová složka řezné síly na hřbetu závisí na hodnotě opotřebení nástroje na hřbetu. Bylo zjištěno, že řezná síla na hřbetu při zvětšení šířky opotřebení nástroje vzroste na hřbetu až o 45 – 55 %, při obrábění nerez oceli 17240 o 4 – 8 %, při obrábění konstrukční oceli 12 050.1 o 20 – 25%, při obrábění slitiny hliníku 42 4222 o 40 – 60 %.

5. Urychlená metoda určení řezných sil na hřbetu v závislosti na mikrotvrdomsti obráběného materiálu.

V důsledku provedeného literární rešerše bylo stanoveno, že profesor Zorjev dokázal nevhodnost použití tvrdostí obráběného materiálu jako kritéria pro zjednodušení způsobu určení řezných sil na hřbetu pro různé obráběné materiály [3]. V průběhu provedených experimentů byla tato hypotéza potvrzena. Při obrábění nerezové oceli 17240 (tvrdost podle Brinella HB = 300) a konstrukční oceli 12050.1 (tvrdost podle Brinella HB = 240) bylo zjištěno, že síly na hřbetu při obrábění nerez oceli 17240 jsou skoro dvakrát vyšší, než při obrábění konstrukční oceli 12050.1, zatím co tuhost nerez oceli je jenom o 25 % vyšší, než tuhost konstrukční oceli.

Hlavním úkolem mé diplomové práce bylo nabídnout novou urychlenou metodu pro určení sil na hřbetu pro všechny materiály.

Ve fázi experimentu byla navržena domněnka, že hodnoty řezné síly na hřbetu mohou záviset na mikrotvrdomsti obráběného materiálu. Vzorky každého z těchto kovů (slitina hliníku 42 4222, konstrukční ocel 12 050.1, nerez ocel 17240), byly po měření řezných sil posílány do laboratoří katedry materiálů, kde byla změřena mikrotvrdomst obráběného povrchu *HV* dle Vickerse.

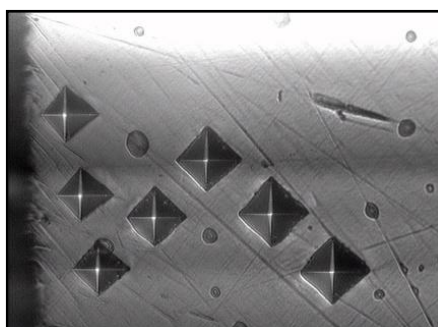


Obr. č. 34. Vzoreky připraveny pro měření mikrotvrdomsti.

Měření mikrotvrdomsti bylo provedeno pomocí mikrotvrdoměru BUEHLER Micrometr 2100 series laboratoří katedry materiálů FS TUL (Obr. č. 35).



Obr. č. 35. Mikrotvrdoměr BUEHLER Micrometr 2100 series laboratoří katedry materiálů FS TUL.



Obr. č. 36. Povrch vzorku po měření mikrotvrdosti HV dle Vickerse pomocí mikrotvrdoměru BUEHLER Micrometr 2100 series laboratoří katedry materiálů FS TUL.

Získané hodnoty měření mikrotvrdosti obrobeneho povrchu byly pro každý materiál zapsány do zvláštní tabulky.

Metoda: Vickers
 Objektiv: 40x
 Zatížení: HV 0,3
 Doba zatížení: 12,000

Tvrdost na povrchu vzorku 2 – 2 (nerez)

	Oblast- povrch	Dist[μm]	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	drsnější	105,5	443,4	36,1	34,7	35,4
2	vypadaný	227,7	369,4	41,5	36,1	38,8

3	Mírně drsný	372,1	391,8	40,0	35,3	37,7
4	drsnější	539,7	371,3	39,2	38,2	38,7
5	Mírně drsný	1071,9	361,6	39,0	39,4	39,2
6	drsnější	1504,7	404,9	35,9	38,2	37,1
7	Mírně drsný	1972,9	418,8	37,0	35,9	36,4
8	drsnější	2364,5	383,4	35,5	40,7	38,1
9	vypadaný	2429,1	367,4	42,7	35,1	38,9
10	Hladší-mezi vypadaným	2985,3	552,8	32,9	30,6	31,7
11	Hladší-mezi vypadaným	3003,1	512,1	34,1	31,8	33,0
12	Hladší-mezi vypadaným	3549,9	487,5	33,7	33,9	33,8
13	Hladší-mezi vypadaným	3907,9	418,8	35,5	37,4	36,4
14	drsný	4259,3	379,3	40,2	36,3	38,3
15	Mírně drsný	4681,9	352,4	39,6	39,8	39,7
16	vypadaný	5067,7	340,0	40,2	40,7	40,5
17	Mírně drsný	5404,7	430,7	37,6	34,3	35,9
18	drsný	5803,5	430,6	38,8	33,1	35,9
19	vypadaný	6190,3	385,3	39,4	36,6	38,0
20	vypadaný	6431,5	359,8	38,0	40,7	39,3
21	drsný	6526,3	518,6	35,1	30,4	32,8
22	vypadaný	6963,9	357,6	35,6	43,3	39,4
23	drsnější	7310,7	387,6	36,5	39,2	37,9
24	drsnější	7579,3	371,3	45,2	32,2	38,7
25	Mírně drsný	7809,0	457,7	40,2	29,5	34,9
26	Mírně drsný	8600,3	467,5	32,2	36,8	34,5
27	Mírně drsný	9148,4	369,2	43,1	34,5	38,8
28	Mírně drsný	9327,5	375,3	37,8	39,2	38,5
29	Mírně drsný	9584,5	352,4	39,8	39,6	39,7
30	Mírně drsný	9973,5	387,6	38,0	37,8	37,9
31	Mírně drsný	10053,0	386,8	36,3	39,5	37,9
32	Mírně drsný	10172,7	492,2	40,8	26,5	33,6
33	Mírně drsný	10213,9	418,8	38,6	34,3	36,4

Minimum: 340,0

Maximum: 552,8

Průměr: 409,2

Tab. č. 4. Hodnoty měření mikrotvrdosti povrchu pro nerez ocel 17 240.

U každého materiálu byla změřena tvrdost v jádru vzorku. Výsledek pro každý vzorek byl uveden v tabulce, viz Tab.č. 5.

Metoda:

Vickers

Objektiv:

40x

Zatížení:

HV 0,3

Doba zatížení:

12,000

Tvrdost v jádře vzorku 2 - 2

	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	280,2	43,9	45,2	44,6

2	282,8	43,7	45,0	44,4
3	290,8	43,5	43,9	43,7
4	267,7	46,4	44,8	45,6

Minimum: 267,7 **Maximum:** 290,8

Průměr: 280,4

Tab.č. 5. Hodnoty měření tvrdosti v jádru vzorku pro nerez ocel 17 240.

Veškeré naměřené hodnoty mikrotvrdosti obrobeného povrchu a tvrdost v jádře vzorku pro každý materiál jsou v příloze č. 2, 3.

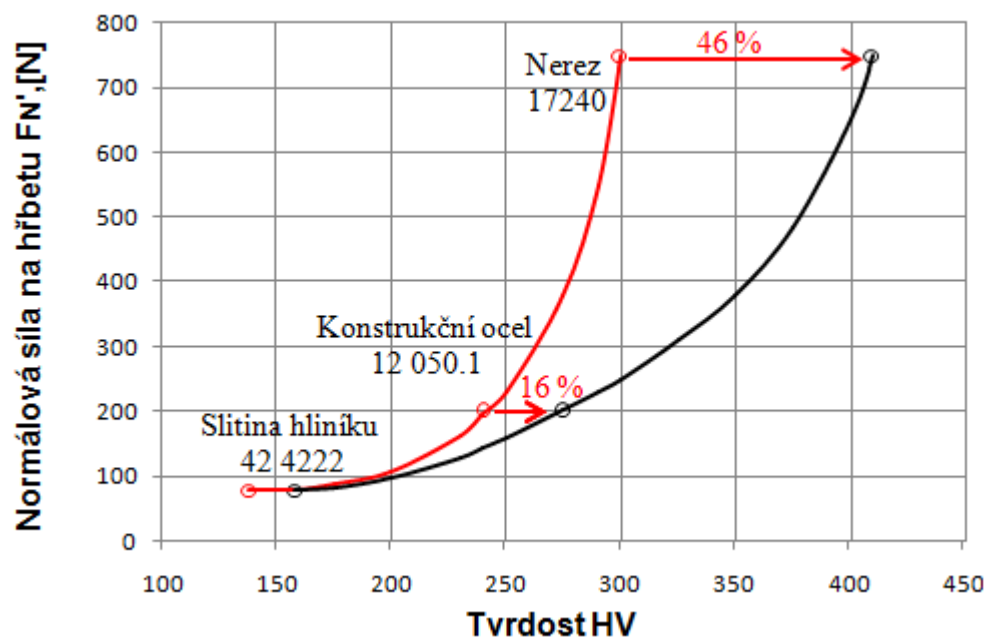
Výsledky průměrných hodnot tvrdosti v jádru vzorku a obrobeného povrchu byly shrnuty do tabulky Tab.č. 6.

Druh materiálu.	Tvrdost v jádře vzorku, (HV).	Tvrdost na povrchu, (HV).	Hodnota zpevnění povrchu, %.
slitina hliníku 42 4222	138	158	15
konstrukční ocel 12 050.1	235	274	16
nerez 17240	280	409	46

Tab.č. 6. Výsledky průměrných hodnot tvrdosti v jádru vzorku a obrobeného povrchu a hodnoty zpevnění zkoumaných materiálů.

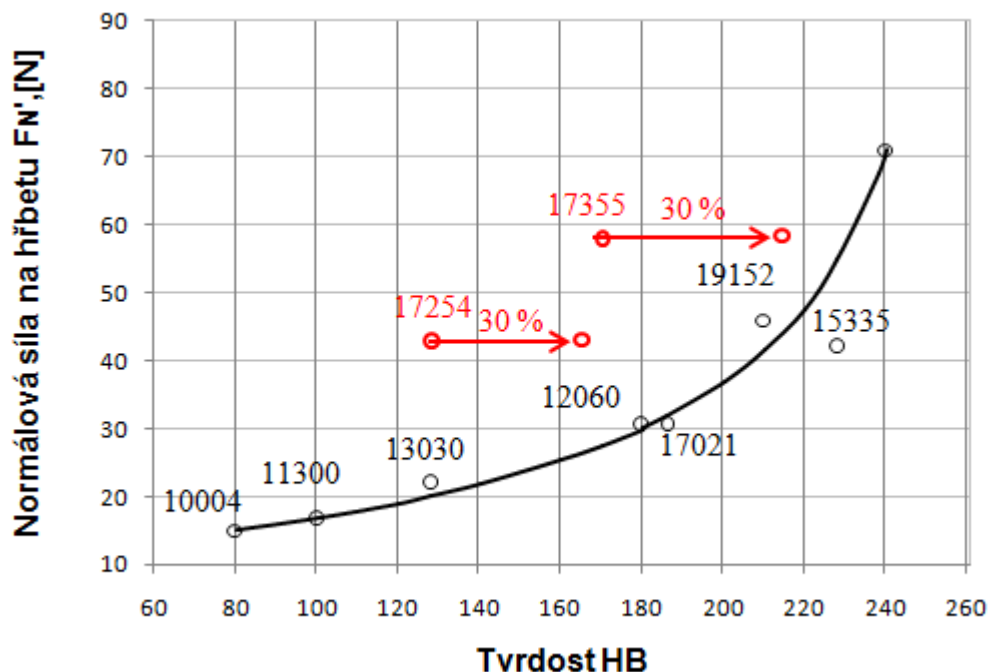
Jak je vidět z tab.č. 6, mikrotvrdost obrobeného povrchu je vyšší, než tvrdost v jádru vzorku. Toto se vysvětluje tím, že v průběhu obrábění probíhá zpevnění povrchové vrstvy kovu. Nerez ocel 17240 má větší náchylnost k zpevnění, než hliník a konstrukční ocel, což je dáno jeho austenickou strukturou.

Na základě hodnot z tabulky č. 6 byly sestaveny grafy závislosti svislé složky řezné síly na mikrotvrdosti obrobeného povrchu a na tvrdosti v jádře vzorku (Graf č.5). Černou barvou je na grafu zobrazena závislost normálové složky síly na hřbetu F_N' na hodnotách tvrdosti materiálů v jádře HV. Červenou barvou je na grafu zobrazena závislost normálové složky síly na hřbetu F_N' na mikrotvrdosti obrobeného povrchu HV.



Graf č.5. Závislosti normálové složky řezné síly na hřbetu F_N' na mikrotvrlosti obrobeného povrchu a na hodnotě tvrdosti materiálů v jádře HV.

Hodnoty tvrdosti podle Brinella a hodnoty tvrdosti podle Vickerse se v rozmezí od 100 do 450 neliší více než o 7%. Díky tomu je možná kontrola kritérií mikrotvrlosti pro urychlené určení normálové síly na hřbetu, kdy se přenesou body hodnot normálové síly na hřbetu pro nerez ocel 17253 a pro nerez ocel 17353 vyplývající z grafu profesora Zorjeva [3] na hodnotu relativního zpevnění nerez oceli 17 240. Jelikož tyto materiály, stejně jako i zkoumaný nerez 17240, mají astenickou strukturu. To znamená, že jsou náchylné ke zpevnění. Relativní zpevnění nerez 17240 je poměrné zpevnění obrobeného povrchu slitiny hliníku 42 4222 a konstrukční ocele 12 050.1 (46 % – 16 % = 30 %). Relativní zpevnění obrobeného povrchu nerez 17240 je 30%. Je nutné také upřesnit, že tyto změny byly provedeny jen pro kontrolu kvality teorie použití mikrotvrlosti obrobeného povrchu, ne pro reálné upřesnění grafu profesora Zorjeva.



Graf č.6. Závislost normálové složky řezné síly na hřbetu F_N' na tvrdosti materiálu.

Body hodnot normálové síly na hřbetu F_N' pro nerez ocel 17253 a pro nerez ocel 17353 vyplývající z grafu jsou posunuty na 30 %.

Jak je vidět na grafu č. 6, při posunu bodů hodnot normálové složky síly na hřbetu F_N' pro nerez ocel 17253 a pro nerez ocel 17353 na hodnotu relativního zpevnění obrobeného povrchu nerez oceli 17240 přijaté přesně 30% na ose tvrdosti HB, se body nachází v bezprostřední blízkosti křivky. To znamená, že přijetí hodnoty mikrotvrdosti obrobeného povrchu jako kritéria pro urychlenou metodiku určení normálové složkové síly řezání na hřbetu F_N' je správné.

Jak bylo řečeno výše, posuv hodnot na 30% byl proveden jen proto, aby kvalitativně ověřit teorii závislosti hodnoty síly řezání na hřbetu na mikrotvrdosti obrobeného povrchu. Během zkoumání se bralo na vědomí, že tato teorie v budoucnosti požaduje spoustu upřesnění, čímž bych se rád zabýval v rámci pokračování mého studia jako doktorand katedry.

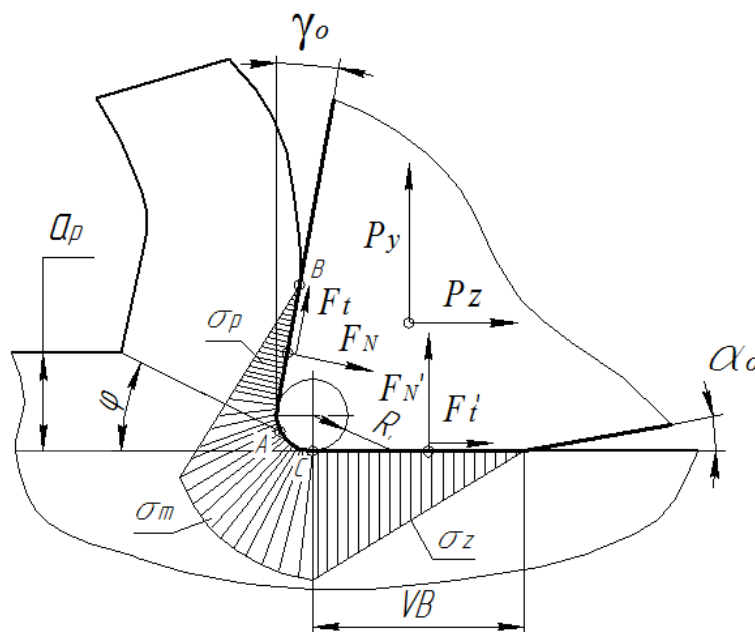
Závěr:

Bylo stanoveno, že po obrábění nerezové oceli 17240 dochází ke zpevnění obrobené vrstvy o 46%, po obrábění konstrukční oceli 12050.1. dochází ke zpevnění obrobené vrstvy o 16%, a po obrábění slitiny hliníku 424222 dochází ke zpevnění obrobené vrstvy o 15%.

Na základě provedených zkoumání bylo poprvé navrženo použití mikrotvrdosti obrobeného povrchu jako kritéria pro urychlenou metodu určení řezné síly na hřebtu pro různé obráběné materiály, což umožnilo zvýšit přesnost určení sil na hřebtu o 30%.

5. Kontrola přesnosti matematického modelu profesora Hrubého pro výpočet řezné síly na hřbetu při obrábění různých materiálů.

Podstata matematického modelu profesora Hrubého spočívá v tom, že se řezné síly na hřbetu vypočítávají z dotykového napětí vznikajícího na povrchu řezu v místě kontaktu povrchů nástroje s povrchy obrobené součástky. Rozdělení těchto napětí je zobrazeno na obrázku č. 37.



Obr. č. 37. Rozdělení dotykových napětí mezi povrchy řezného nástroje a povrchy obrobené součástky dle matematického modelu profesora Hrubého.

Na Obr. č. 37:

P_y - vertikální složka s výslednou řeznou silou

P_z - horizontální složka s výslednou řeznou silou

F_t - třecí síla na čele nástroje

F_N - normálová složka na ploše styku třísky s čelem řezného nástroje

F'_t - třecí síla na hřbetu nástroje

F'_N - normálová složka na hřbetu nástroje

σ_z - dotykové napětí na hřbetu nástroje

σ_m - dotykové napětí na poloměru hrotu

σ_p - dotykové napětí na čele nástroje

VB – šířka opotřebení na hřbetu nástroje

γ_o - nástrojový ortogonální úhel čela

α_o - nástrojový ortogonální úhel hřbetu

a_p - hloubka záběru

R - poloměr hrotu

φ - úhel střižné roviny

Pro výpočet sil na hřbetu se používají následující hodnoty:

V - řezná rychlost, [m/s]

b - šířka řezu, [mm]

a_p - hloubka záběru, [mm]

R - poloměr hrotu, [mm]

VB - šířka opotřebení na hřbetu nástrojů, [mm]

γ_o - nástrojový ortogonální úhel čela, [grad]

α_o - nástrojový ortogonální úhel hřbetu, [grad]

$R_m, R_{e\min}$ - mechanické vlastnosti materiálu, [MPa]

Samotný výpočet je proveden ve formě počítačového programu (Obr. č. 38).

Вариант 2) - по максимальной нормальной нагрузке от передней к задней поверхности

Скорость резания v , м/с: 0,0075

Ширина среза b , мм: 7,9

Толщина среза a , мм: 0,0035

Радиус округления кромки r_0 , мм: 0,03

Передний угол резца γ_{am} , град: 7

Задний угол α_0 , град: 3

Обрабатываемый материал:

σ_{max} , МПа: 610

σ_{mat} , МПа: 360

δ , %: 16

Козф. трения на задней поверхн. μ_1 : 0,61

Износ по задней грани h_z , мм: 0,15

начать расчет

выход из расчета

силы на радиусной части передней поверхности (ниже точки A0)

$P_1 = 37,99$ Н

$P_2 = 22,74$ Н

максимальное нормальное напряжение $\sigma_{\text{max}} = 889,5$ МПа

силы на радиусной части задней поверхности (ниже точки A)

$P_{zAC} = 24,57$ Н

$P_{yAC} = 99,29$ Н

силы на задней поверхности правее точки C

тангенциальная $F_2 = 351,5$ Н

нормальная $N_2 = 527$ Н

коэф. трения $\mu_2 = 0,6663$

суммарные силы

тангенциальная $P_{z0} = 414$ Н

нормальная $P_{y0} = 649,1$ Н

--- расчет окончен ---

Obr. č. 38. Počítačový program pro výpočet sil na hřbetu dle matematického modelu rozdělení dotkových napětí profesora Hrubého.

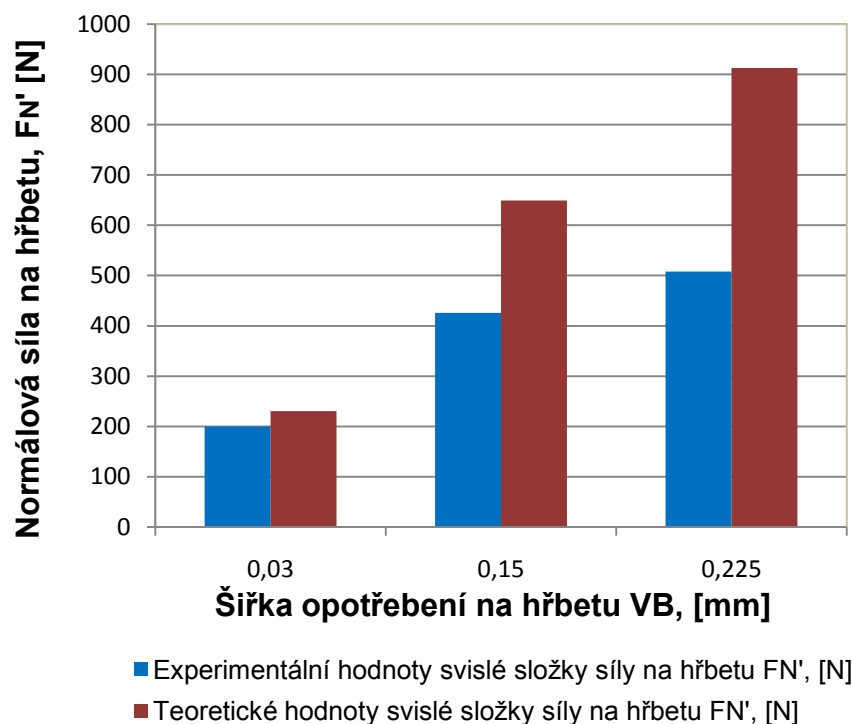
Pomocí tohoto počítačového programu výpočtu sil na hřbetu byly zjištěny síly na hřbetu při obrábění konstrukční oceli 12050.1 při různých šířkách opotřebení na hřbetu nástrojů VB.

V tabulce č. 7 jsou zobrazeny teoretické výsledky výpočtu svislé složky síly na hřbetu F_N' získané pomocí matematického modelu rozdělení dotykových napětí, a hodnoty získané experimentálně metodou změny tloušťky řezu. V tabulce je také uveden procentuální rozdíl získaných hodnot.

Šířka opotřebení na hřbetu nástrojů VB, [mm]	<i>Experimentální hodnoty</i> svislé složky síly na hřbetu F_N' , [N]	<i>Teoretické hodnoty</i> svislé složky síly na hřbetu F_N' , [N]	Rozdíl hodnot získaných experimentálně a teoreticky, %
0,03	200	230,2	15,1 %
0,15	426	649,1	52,4 %
0,225	508	912,6	79,6 %

Tab. č. 7. Hodnoty sil na hřbetu F_N' získané výpočtem dle matematického modelu rozdělení dotykových napětí při řezání, a hodnoty získané experimentálně metodou změny tloušťky seříznuté vrstvy při různých šířkách plošky opotřebení na hřbetu VB při obrábění konstrukční oceli 12.050.1.

Pro pochopení rozdílu teoretických a experimentálních hodnot zobrazených v tabulce č. 7 byl sestaven graf závislosti těchto hodnot síly na hřbetu F_N' na hodnotě šířky opotřebení VB (Obr. č. 39.)



Obr. č. 39. Závislost hodnot svislé složky síly na hřbetu F_N' získaných výpočtem dle matematického modelu rozdělení dotykových napětí při řezání, a hodnot získaných experimentálně metodou změny tloušťky seříznuté vrstvy na hodnotách šířky plošky na hřbetu VB při obrábění konstrukční ocele 12.050.1.

Jak je vidět z Obr. č. 39, rozdíl hodnot získaných teoreticky a experimentálně se zvyšuje s růstem šířky plošky opotřebení na hřbetu VB do 80 %. Nicméně, při malých hodnotách opotřebení výpočet poskytuje výsledek s rozdílem jen 15%. Na základě toho bylo doporučeno upřesnění matematického modelu profesora Hrubého pro výpočet sil řezání na hřbetu při šířkách opotřebení VB větších 0,05 mm.

Závěr:

Bylo provedeno hodnocení přesnosti matematického modelu profesora Hrubého pro výpočet řezných sil na hřbetu při různých šířkách opotřebení nástroje na hřbetu. Rozdíly hodnot normálové složkové řezné síly na hřbetu získané během experimentu a pomocí výpočtu činily: 15,1 % pro minimální šířku plošky opotřebení hřbetu 0,03 mm, 52,4 % pro šířku plošky opotřebení hřbetu 0,15 mm a 79,6 % pro maximální šířku plošky opotřebení hřbetu 0,225 mm. Na základě toho byly profesorovi Hrubému poskytnuta doporučení pro upřesnění matematického modelu pro šířku opotřebení větší než 0,05 mm.

6. Závěr.

Během vypracování diplomové práce bylo prokázáno, že zkoumání sil na hřbetu je velmi důležité pro pochopení procesu řezání. Použití těchto poznatků pomůže ve zkoumání takových oblastí řezání jako je mikroobrábění, obrábění s malými tloušťkami řezu. Zvětšuje chápání takových procesů jako mechanismus opotřebení na hřbetu. Umožňují provést upřesněný výpočet řezných sil.

Byla prostudována literatura věnovaná studiu sil na hřbetu a odhaleny rozpory. Jedním ze základních rozporů je nemožnost použití tvrdosti obráběného materiálu jako základního kritéria pro rychlejší určení sil na hřbetu.

Také byly zkoumány současné metodiky určení sil na hřbetu. Jedna z metodik byla osvojena, a na jejím základě byl proveden experiment pro určení sil na hřbetu v laboratoři KOM TUL. Byly získány hodnoty sil na hřbetu pro tři materiály při různých hodnotách opotřebení na hřbetu. Také, s pomocí Katedry materiálů byla uskutečněna měření mikrotvrdosti povrchu obrobených vzorků. Pomocí všech hodnot získaných během vypracování diplomové práce byly učiněny závěry nápomocné pro rozšíření představy o procesech probíhajících na hřbetu nástroje při řezání. Tyto závěry budou použity pro další zkoumání sil na hřbetu v rámci mé doktorské práce.

1. Během experimentu bylo potvrzeno, že normálové složka řezné síly na hřbetu nástroje nezávisí na hloubce řezu. Svislá složka celkové řezné síly roste se zvýšením hloubky řezu jen díky růstu normálové složky řezné síly na čele rostoucí se zvýšením hloubky řezu.
2. Během experimentů se dokázalo, že normálová řezná síla na hřbetu nástroje závisí na obráběném materiálu. Normálová řezná síla na hřbetu nástroje, tak i tlakové napětí na hřbetu je při obrábění nerez 17240 vyšší, než při obrábění konstrukční oceli 12 050.1 o 135 – 160 %, a o 530 – 550 % vyšší, než u slitiny hliníku 42 4222. Tímto se vysvětluje zvýšené opotřebení nástroje na hřbetu při obrábění nerez vzhledem k obrábění oceli a slitiny hliníku.
3. Během experimentů bylo potvrzeno, že normálová složka řezné síly na hřbetu závisí na hodnotě opotřebení nástroje na hřbetu. Bylo zjištěno, že řezná síla na hřbetu při zvětšení šířky opotřebení nástroje vzroste na hřbetu až o 45 – 55 %, při obrábění nerez oceli 17240 o 4 – 8 %, při obrábění konstrukční oceli 12 050.1 o 20 – 25%, při obrábění slitiny hliníku 42 4222 o 40 – 60 %.

4. Bylo stanoveno, že po obrábění nerezové oceli 17240 dochází ke zpevnění obrobené vrstvy o 46%, po obrábění konstrukční oceli 12050.1. dochází ke zpevnění obrobené vrstvy o 16%, a po obrábění slitiny hliníku 424222 dochází ke zpevnění obrobené vrstvy o 15%.

Na základě provedených zkoumání bylo poprvé navrženo použití mikrotvrdosti obrobeného povrchu jako kritéria pro urychlenou metodu určení řezné síly na hřbetu pro různé obráběné materiály, což umožnilo zvýšit přesnost určení sil na hřbetu o 30%.

5. Bylo provedeno hodnocení přesnosti matematického modelu profesora Hrubého pro výpočet řezných sil na hřbetu při různých šířkách opotřebení nástroje na hřbetu. Rozdíly hodnot normálové složkové řezné síly na hřbetu získané během experimentu a pomocí výpočtu činily: 15,1 % pro minimální šířku plošky opotřebení hřbetu 0,03 mm, 52,4 % pro šířku plošky opotřebení hřbetu 0,15 mm a 79,6 % pro maximální šířku plošky opotřebení hřbetu 0,225 mm. Na základě toho byly profesorovi Hrubému poskytnuta doporučení pro upřesnění matematického modelu pro šířku opotřebení větší než 0,05 mm.

Seznam literatury.

- [1] PŘIKRYL, Z. – MUSÍLKOVÁ, R.: Teorie odrábění. 3. vyd. Praha, SNTL 1982.
- [2] ZORJEV, N.N. Voprosy mechaniki rezanija metallov. 1. izd. Moskva, Mashinostroenie 1956.
- [3] BODENHAUSEN, J. – MUELLER, W. Use of micro milling for the production of injection moulding. MicroMILLING, March 2005.
- [4] HOLEŠOVSKÝ, F., DUŠÁK, K., JERSÁK, J., aj.: Terminologie obrábění a montáže. 1. vyd. Ústí nad Labem: Universia J.E. Purkyně, ÚTRV, 2005. 208 s. ISBN 80-7044-616-1.
- [5] GAZDA, J.: Teorie obrábění – průvodce tvorbou třísky. Liberec 2009. ISBN 978-80-7083-498-6.
- [6] LUDĚK, P. a kolektiv.: Nauka o materiálu 2. CERM, s.r.o., 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [7] KOCMAN, K. – PROKOP, J.: Technologie obrábění. _ . vyd. Brno, CERM 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [8] LIEMERT, G. – DRÁBEK, F. – ONDRA, J. – VAVŘÍK, I.: Obrabění. 1.vydání. Praha, SNTL 1974. 351 s.
- [9] Carbide and Diamond Tools VHF.
<http://www.vhf.de>
- [10] Mikrofrézy od společnosti Minitex CNC (USA).
<http://www.minitexcnc.com/>
- [11] Mikrofrézy od společnosti METAMASA (Indonesia).
<http://www.metamasa.com/>
- [12] Mikrofrézy od společnosti CIMATRON (USA).
<http://www.cimatron.com>
- [13] Mikrofrézy od společnosti ALIKONTOOL (Česko).
<http://www.alikontool.cz/>
- [14] Návod k univerzální frézce FA - 18.
- [15] Návod k používání nástrojařskou brusce EBN – 2C.
- [16] Návod k používání měřícího přístroje KISTLER.

Seznam příloh.

Příloha č. 1.....fotografie naměřených řezných síl přístrojem KISTLER

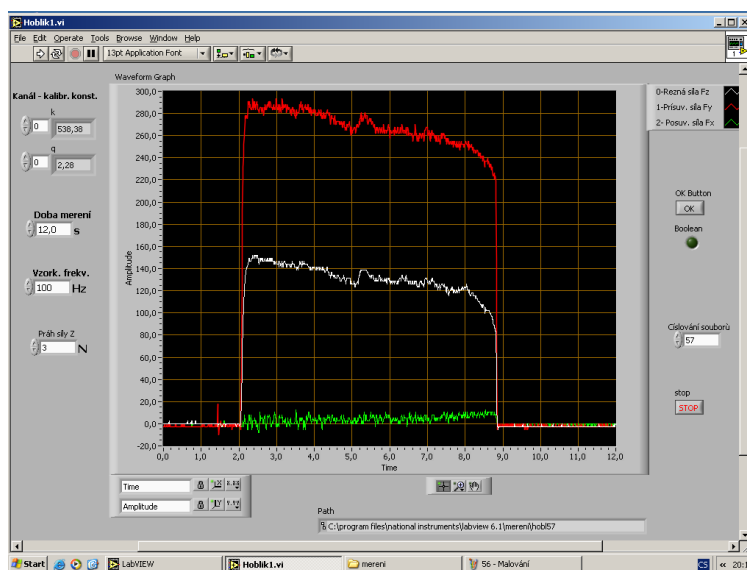
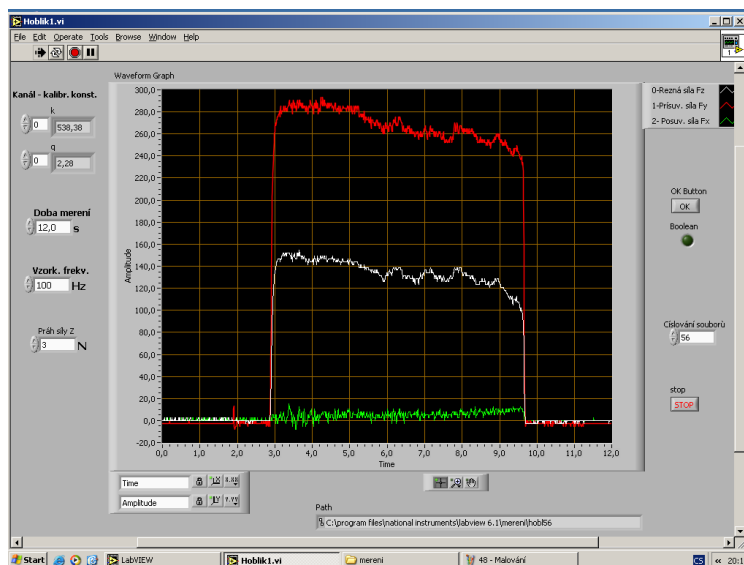
Příloha č. 2.....tab. naměřených hodnot mikrotvrdosti na povrchu.

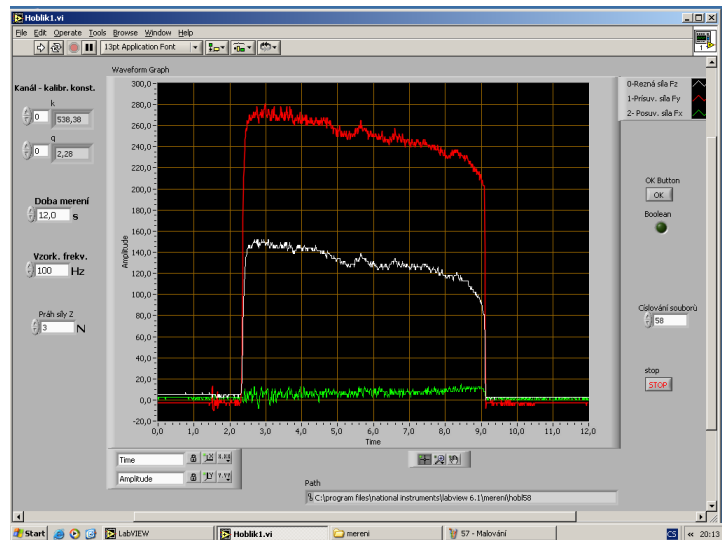
Příloha č. 3.....tab. naměřených hodnot tvrdosti v jádře vzorku.

Příloha č. 1.

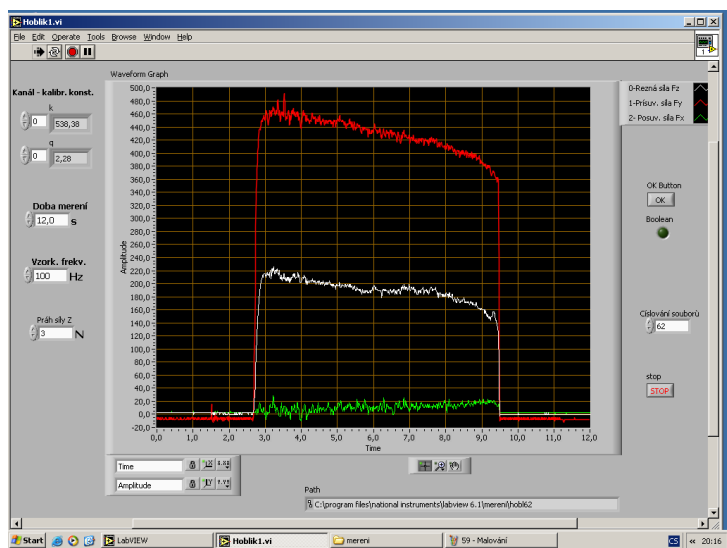
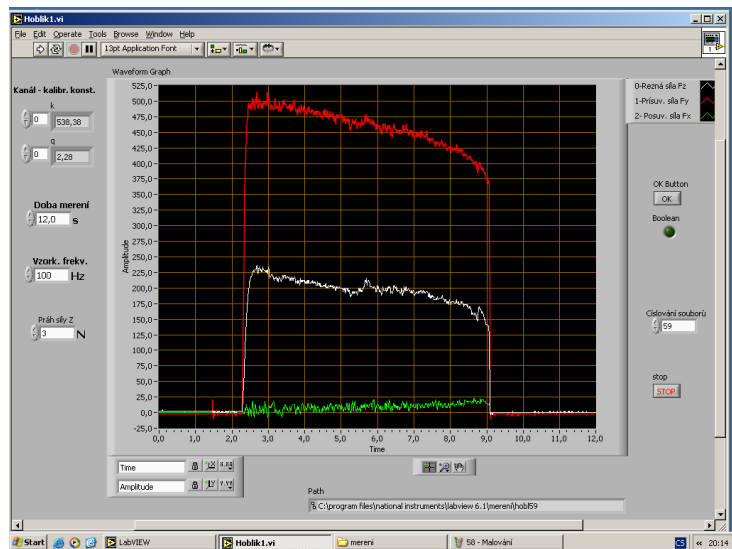
Fotografie naměřených řezných sil přístrojem KISTLER.

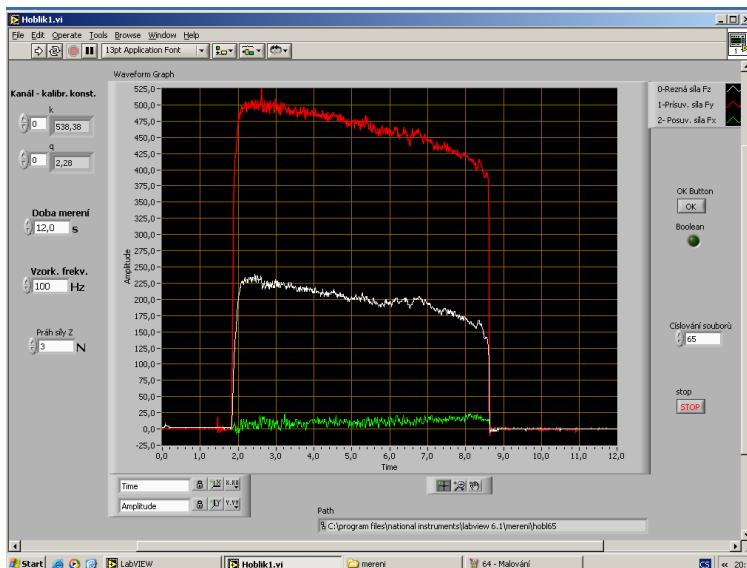
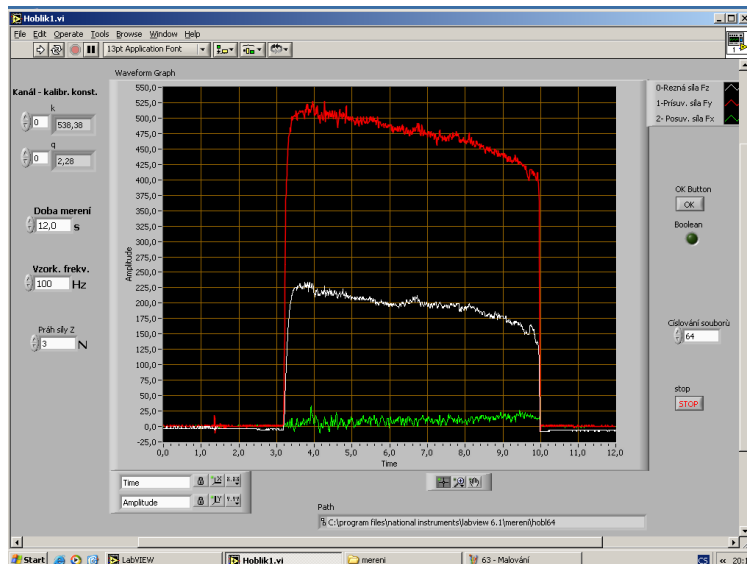
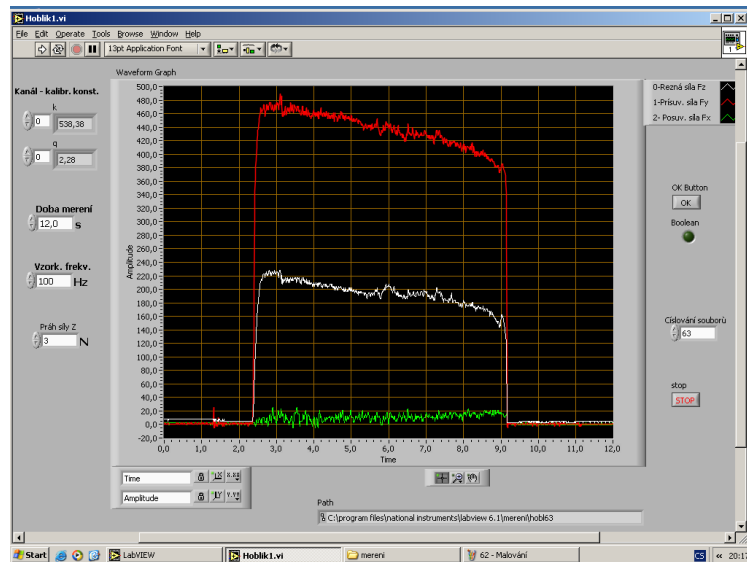
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,03 mm. ap = 0,025 mm.



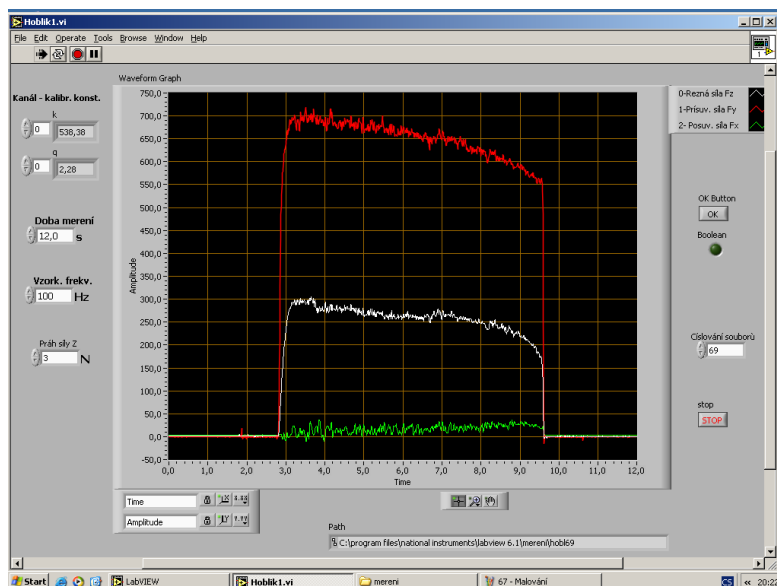
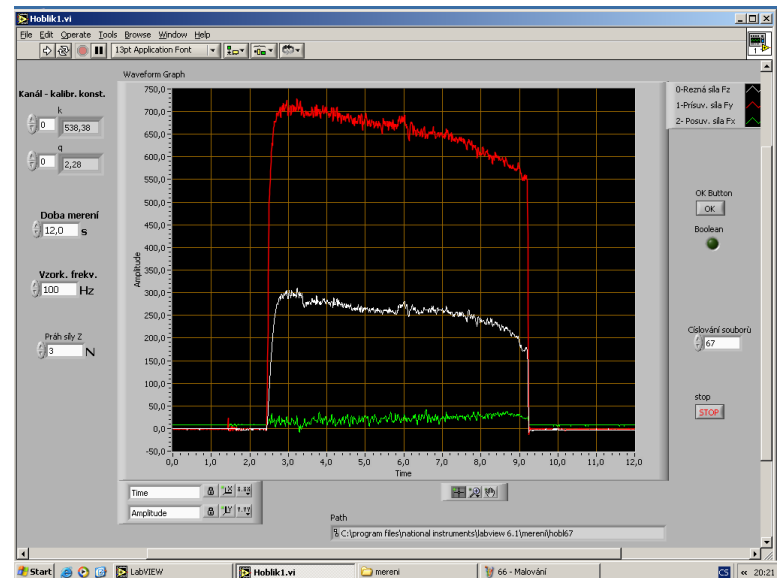
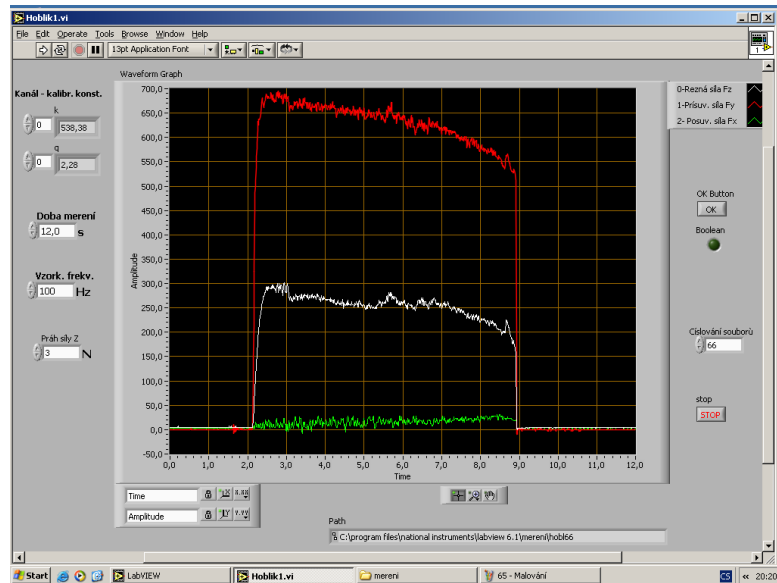


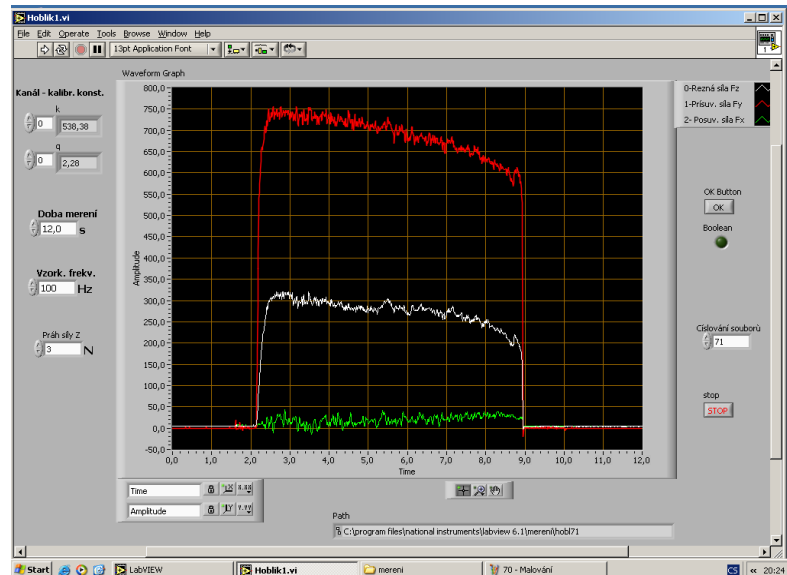
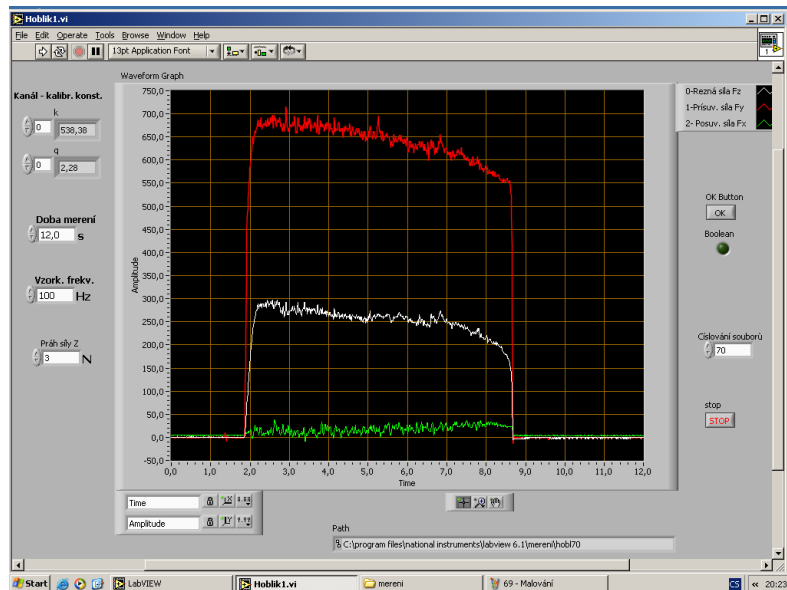
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,03 mm. ap = 0,05 mm.



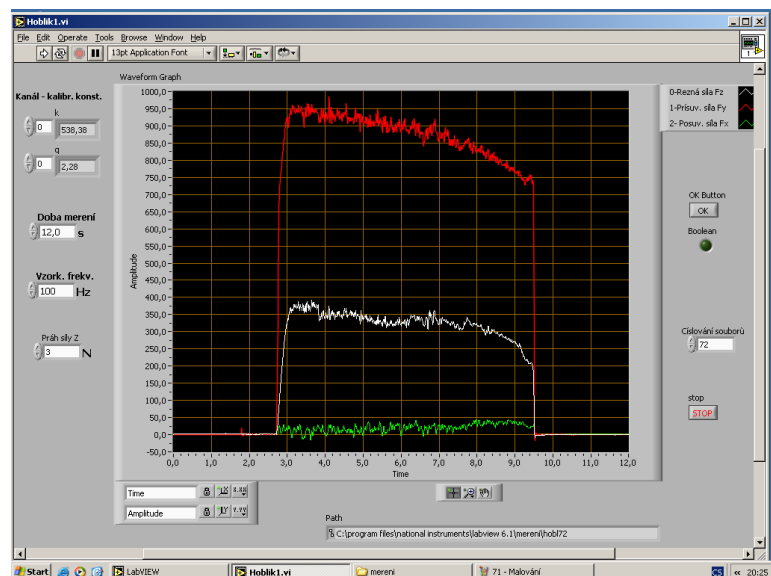


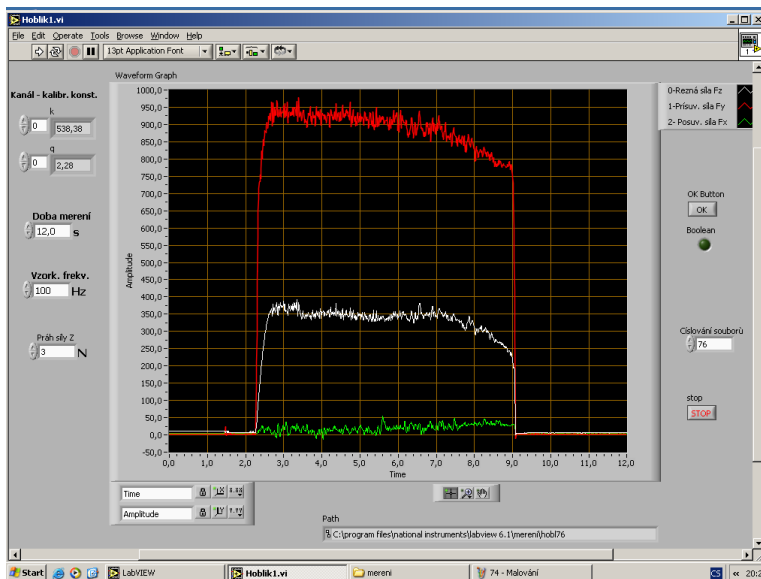
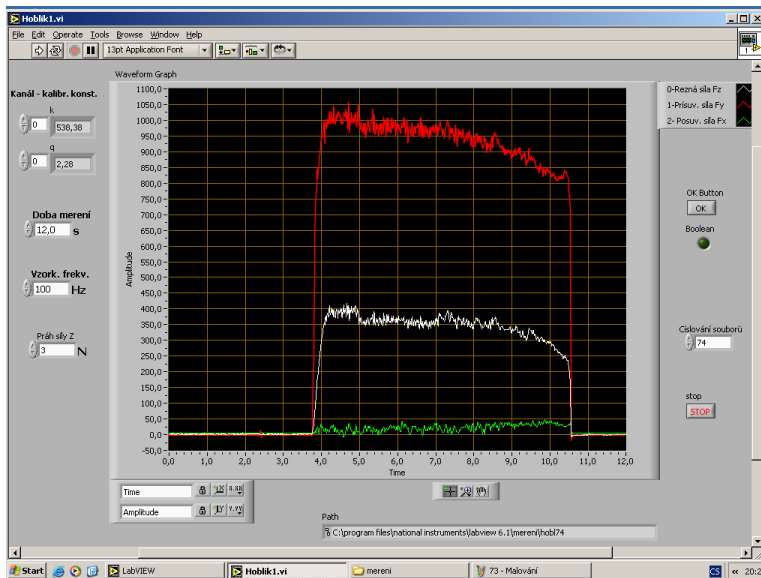
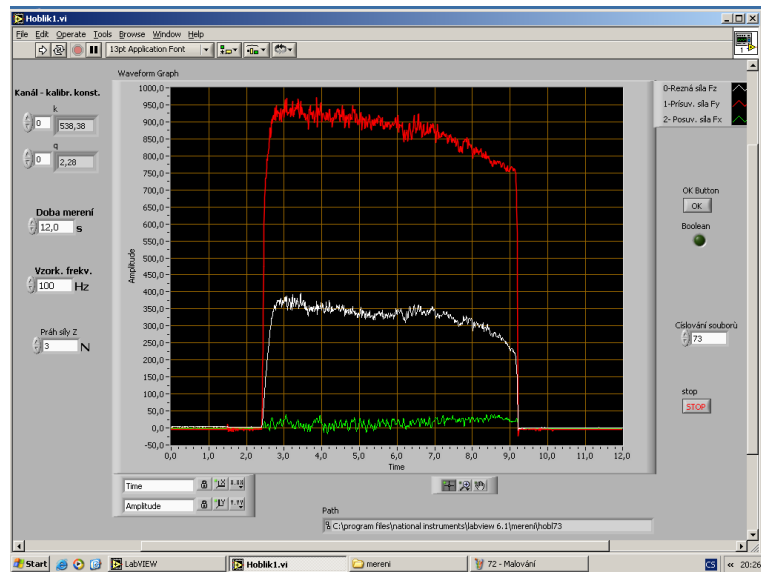
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,03 mm. ap = 0,075 mm.

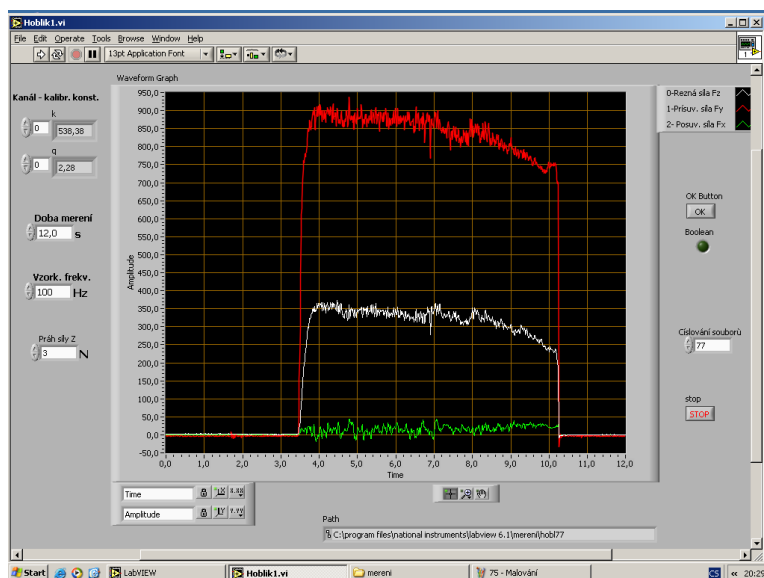




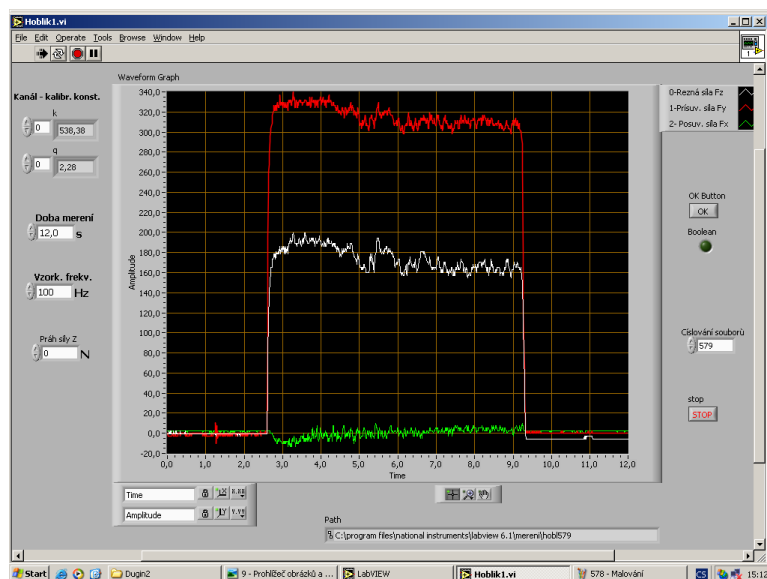
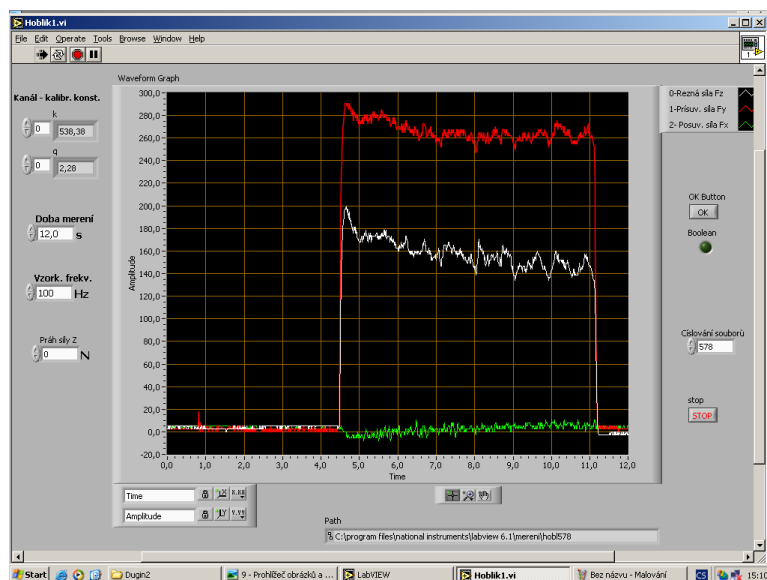
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,03 mm. ap = 0,1 mm.

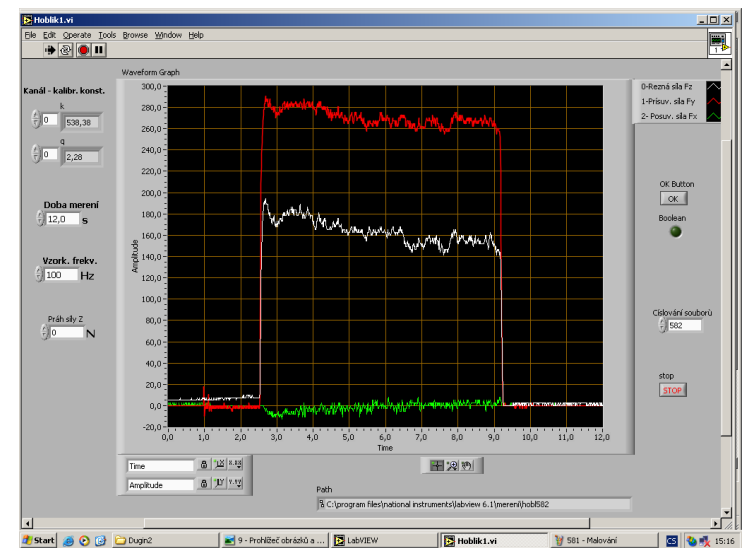
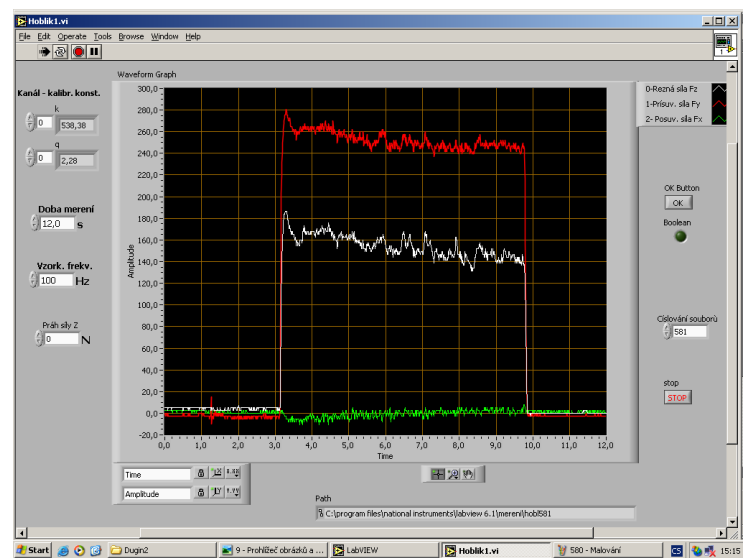
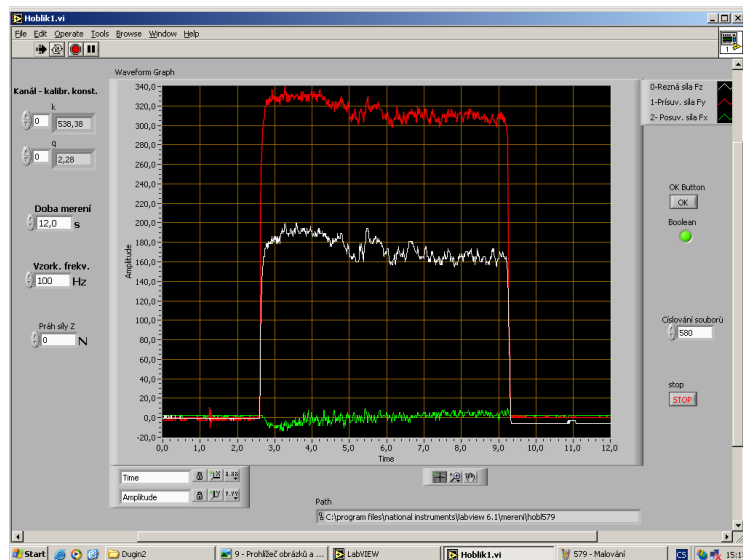




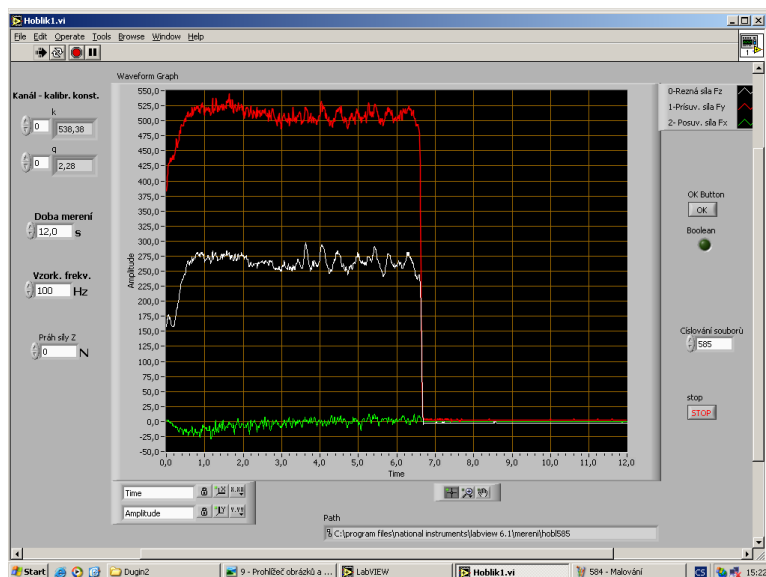
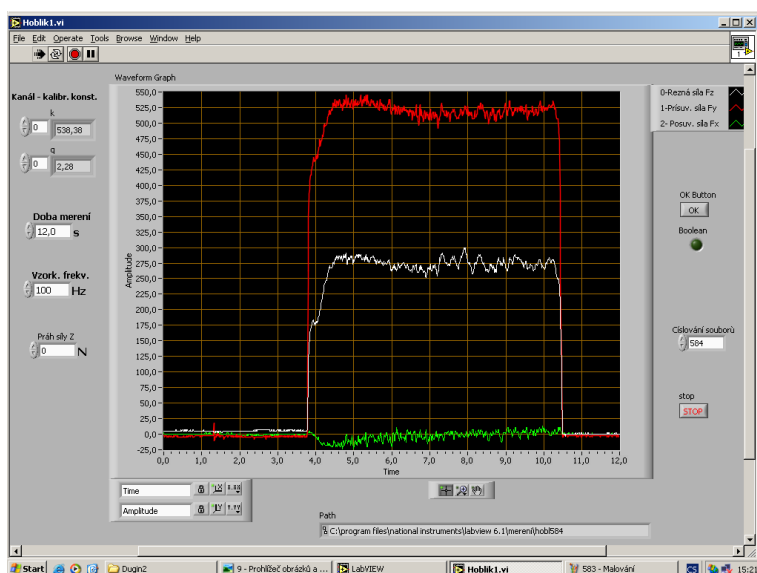
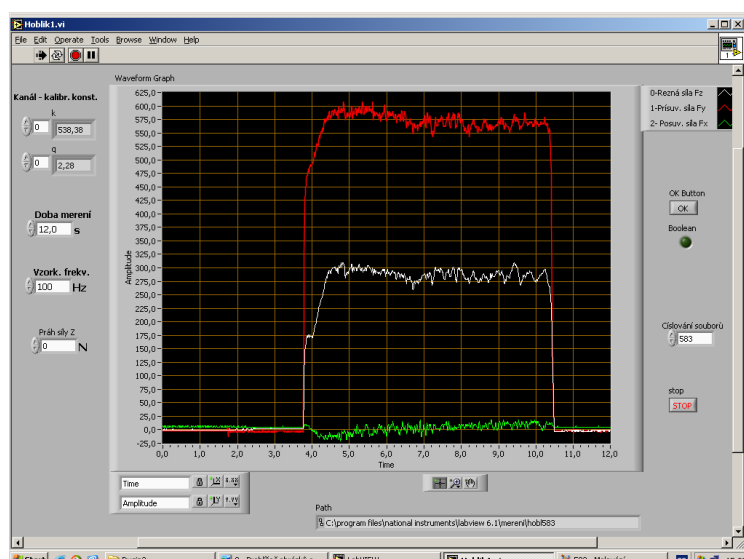


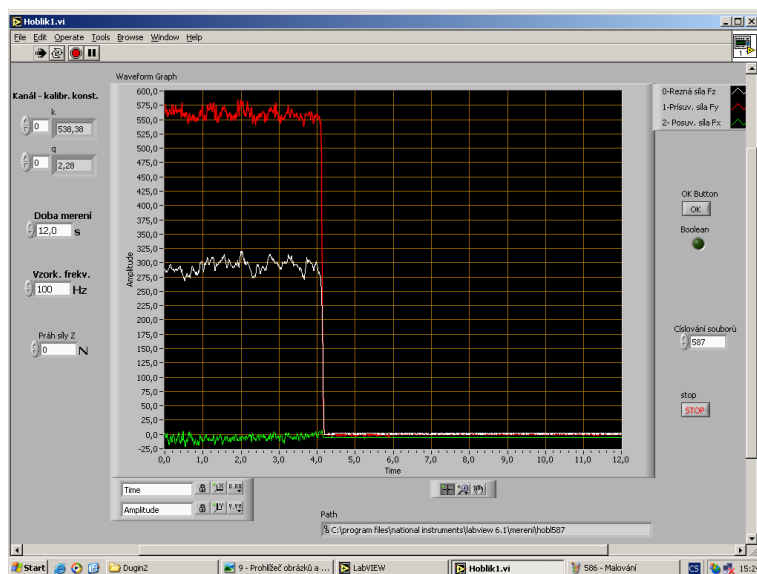
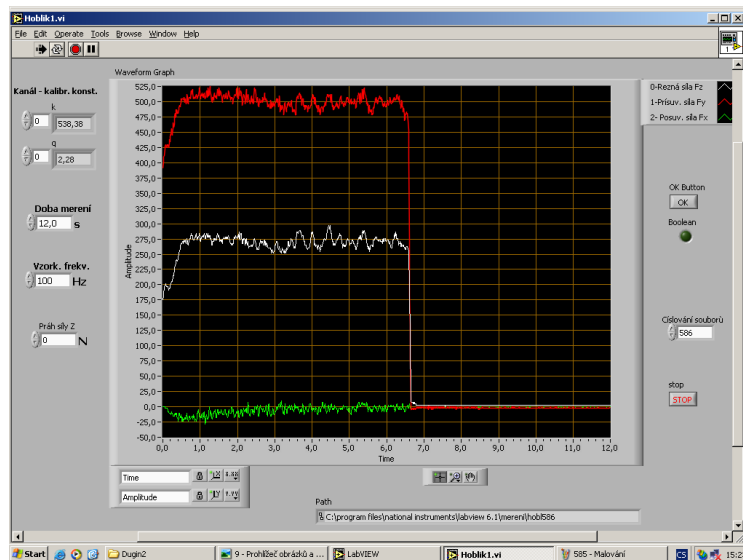
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,15 mm. ap = 0,025 mm.



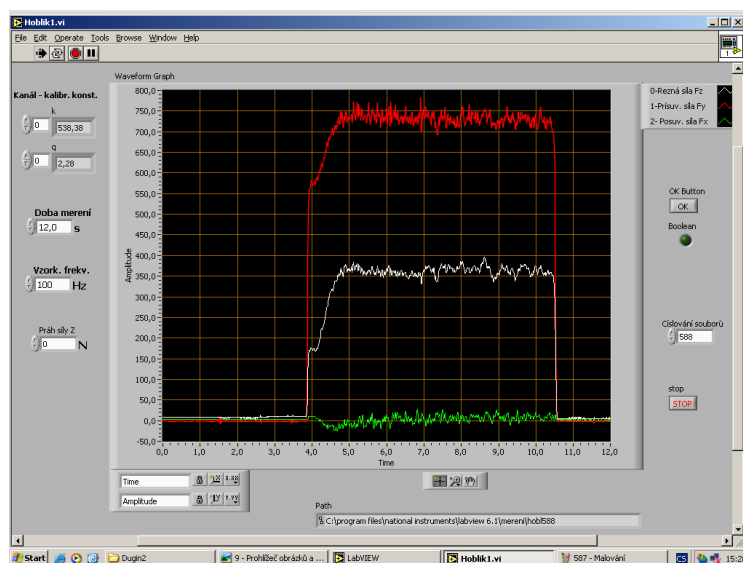


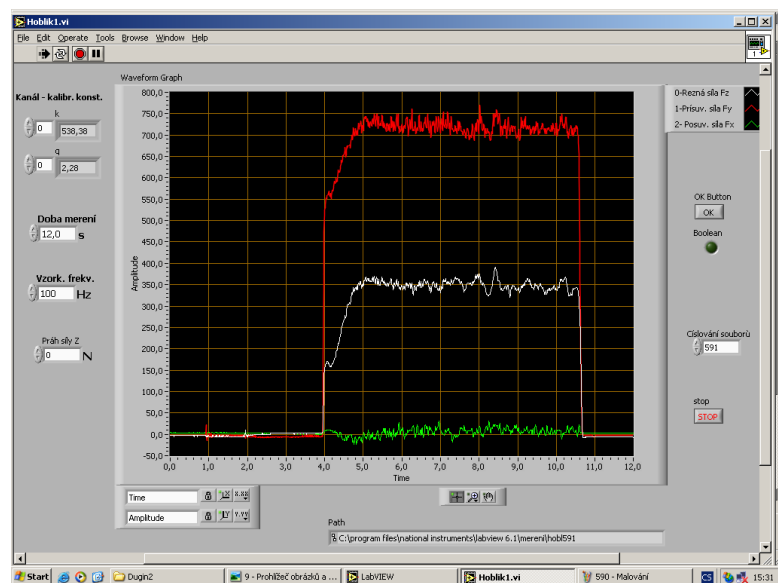
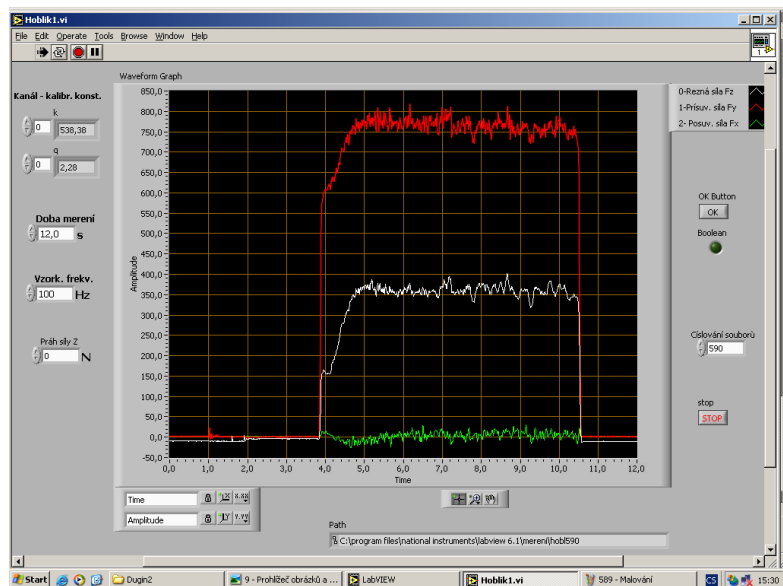
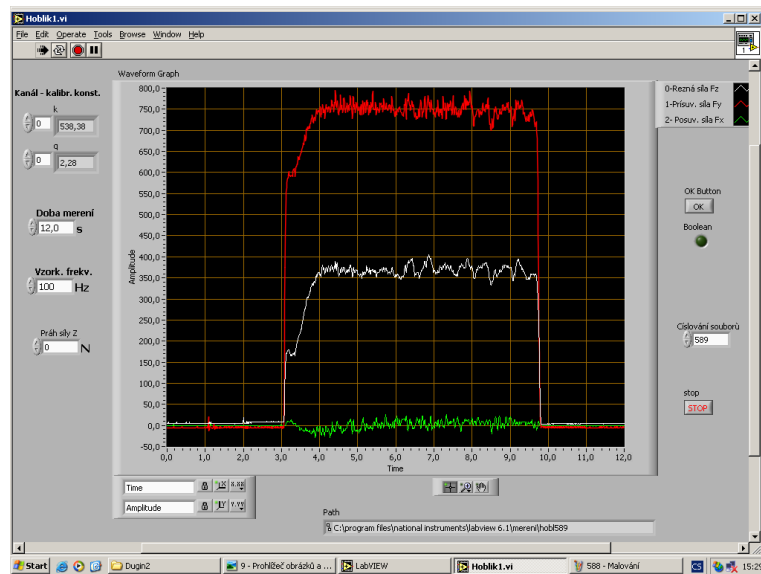
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,15 mm. ap = 0,05 mm.

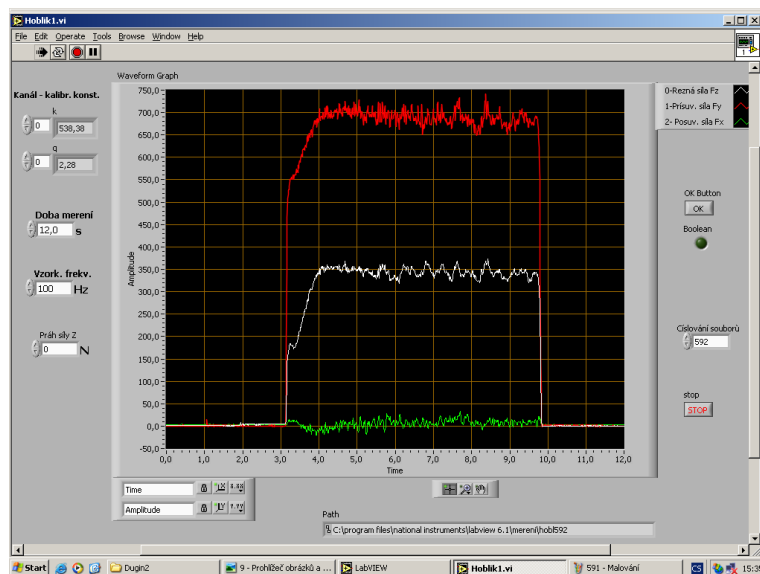




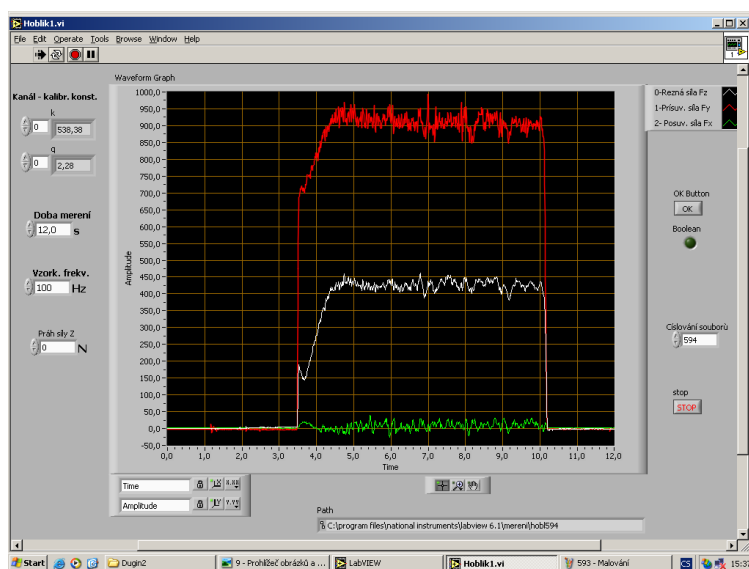
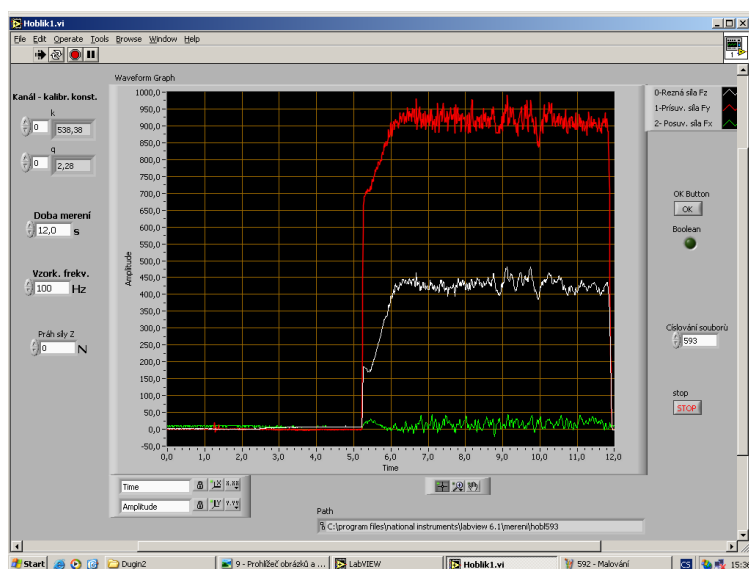
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,15 mm. ap = 0,075 mm.

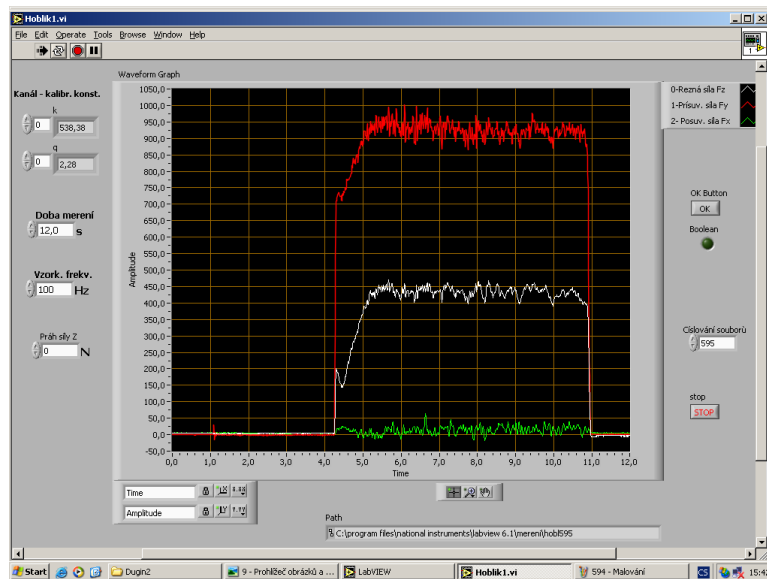




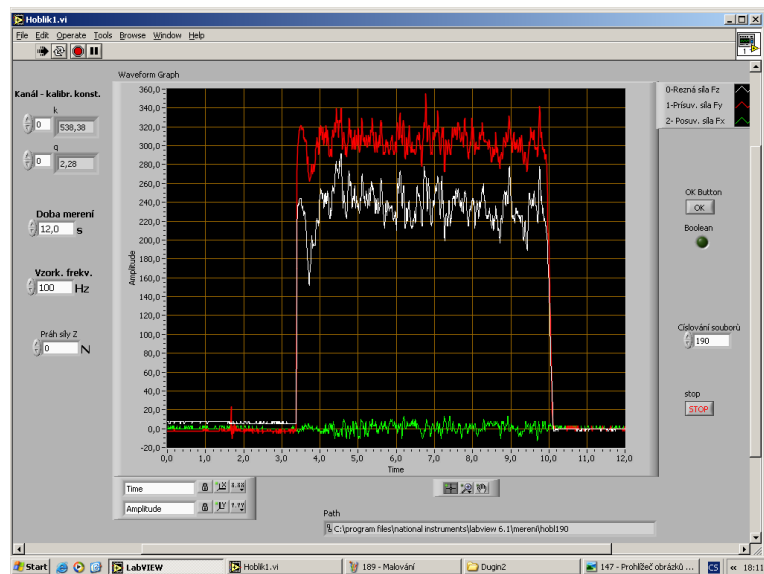
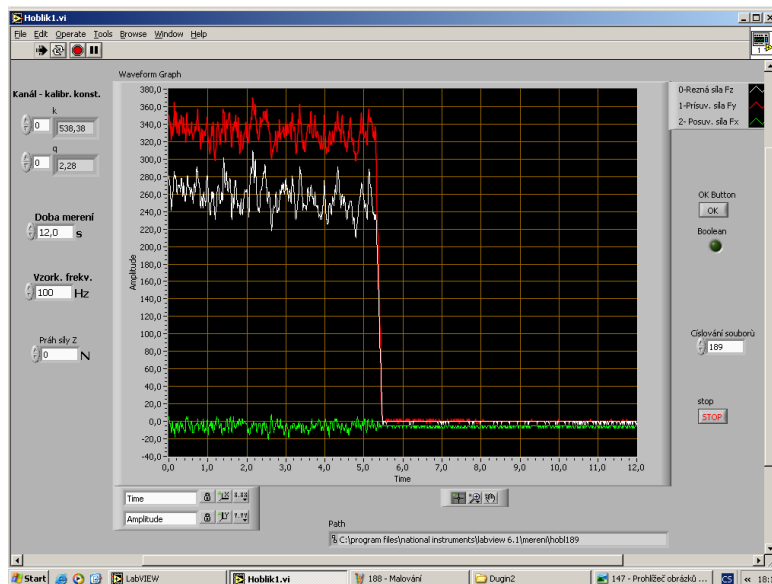


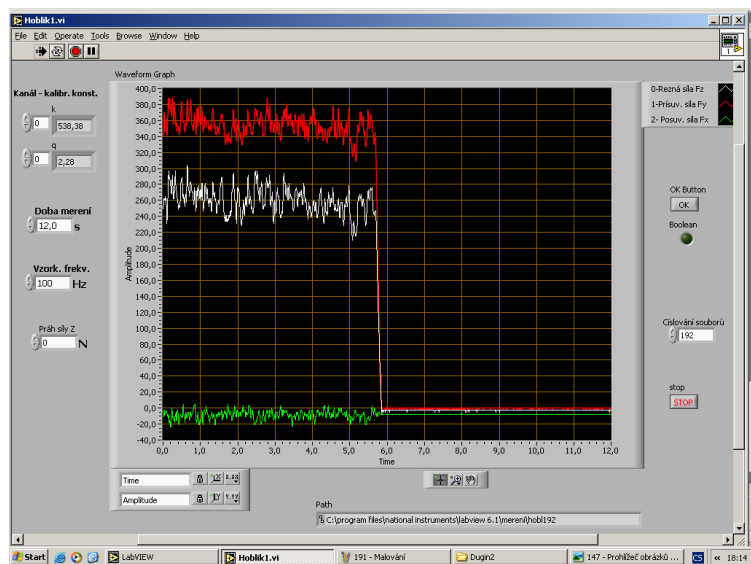
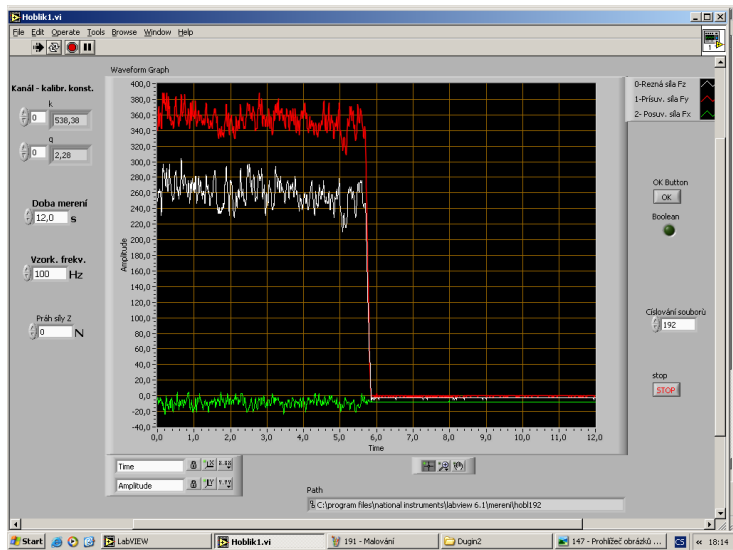
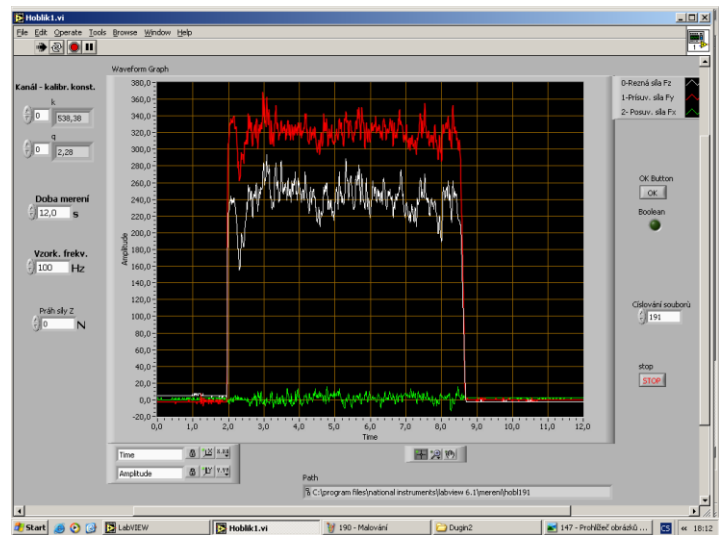
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,15 mm. ap = 0,1 mm.



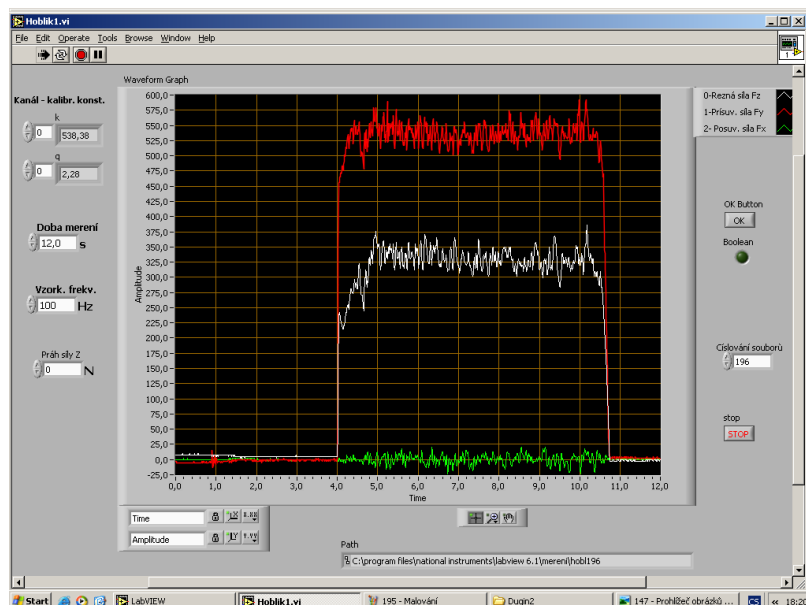
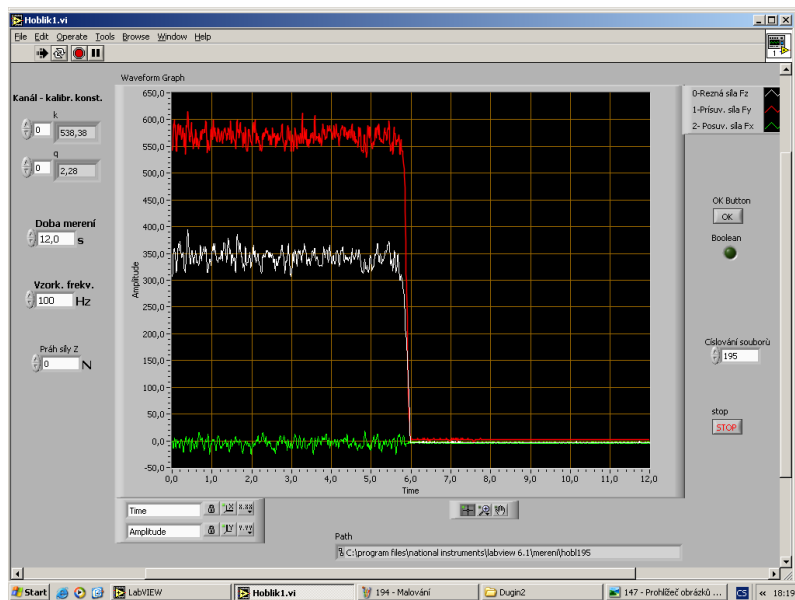
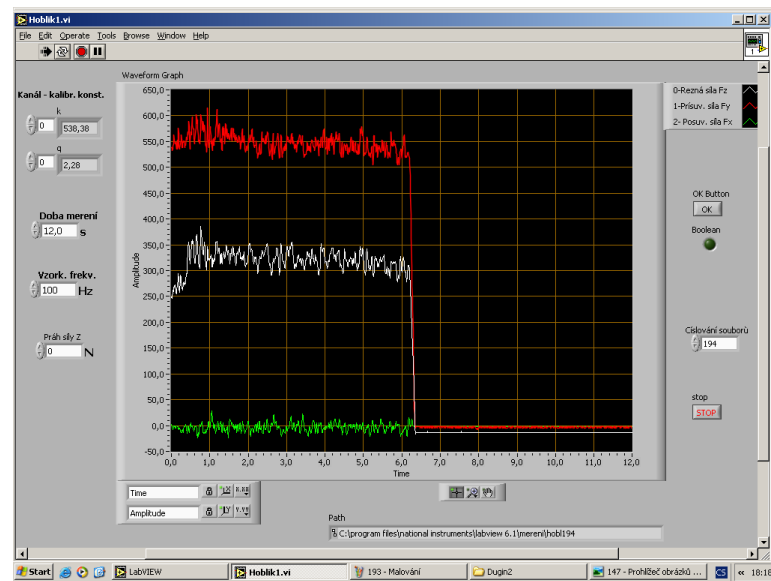


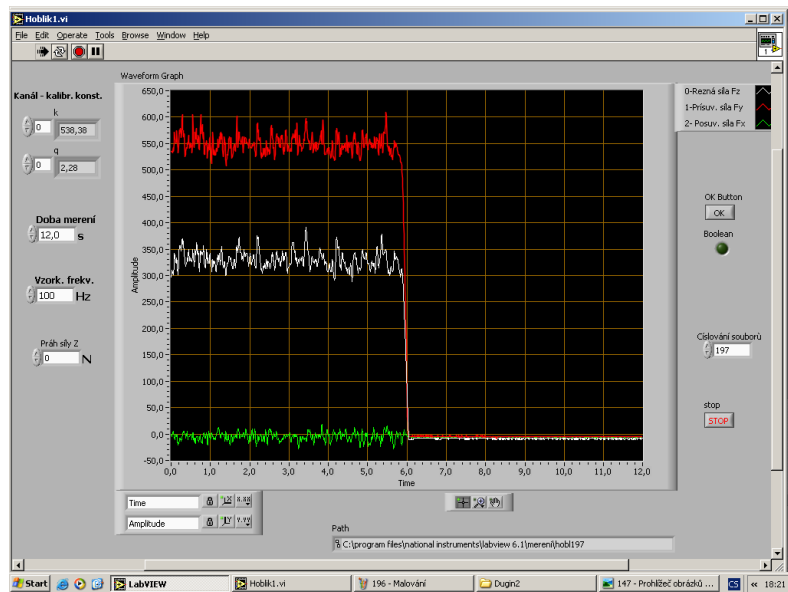
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,225 mm. ap = 0,025 mm.



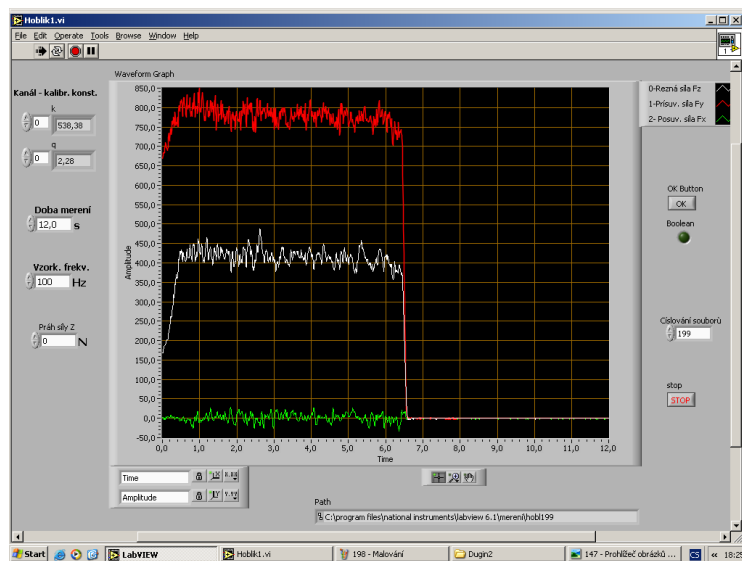


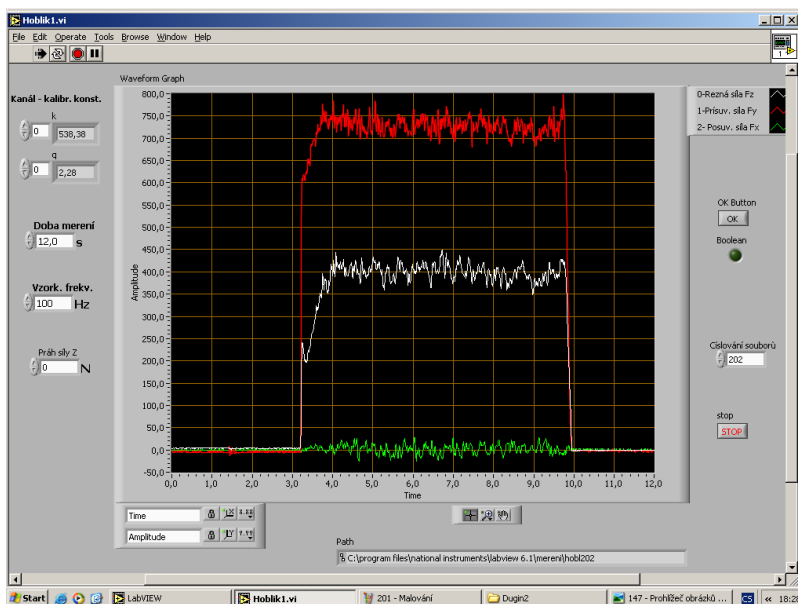
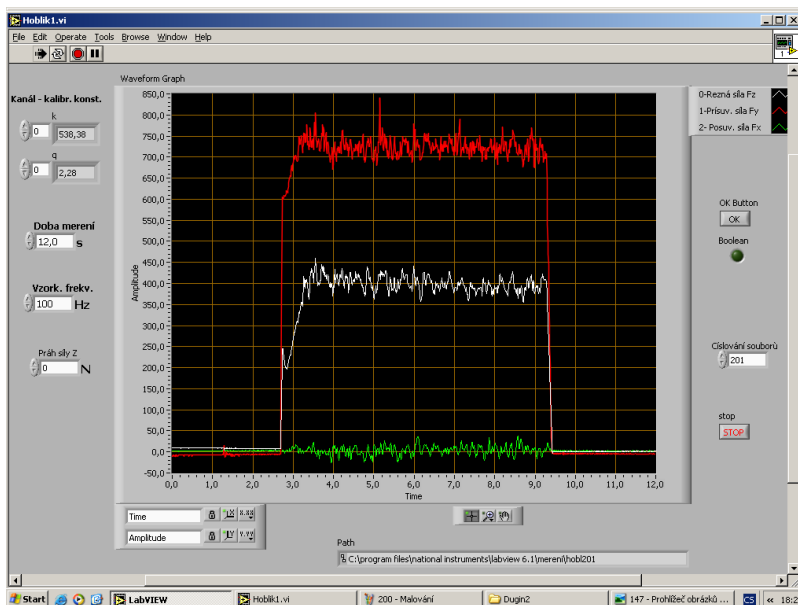
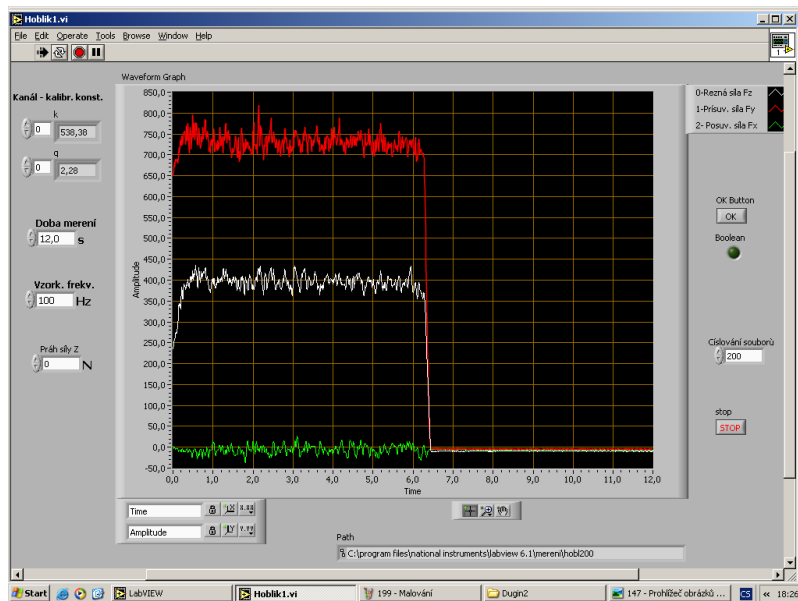
Slitina hliníku 42 4222. $V_B = 0,225 \text{ mm}$. $a_p = 0,05 \text{ mm}$.

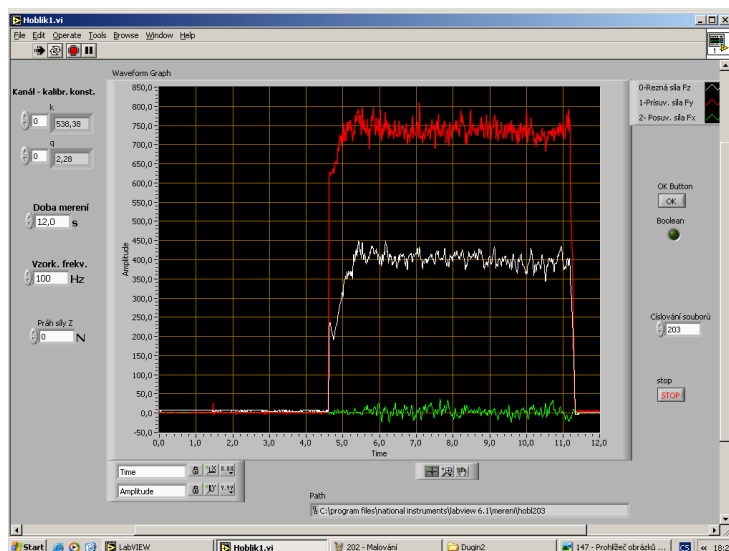




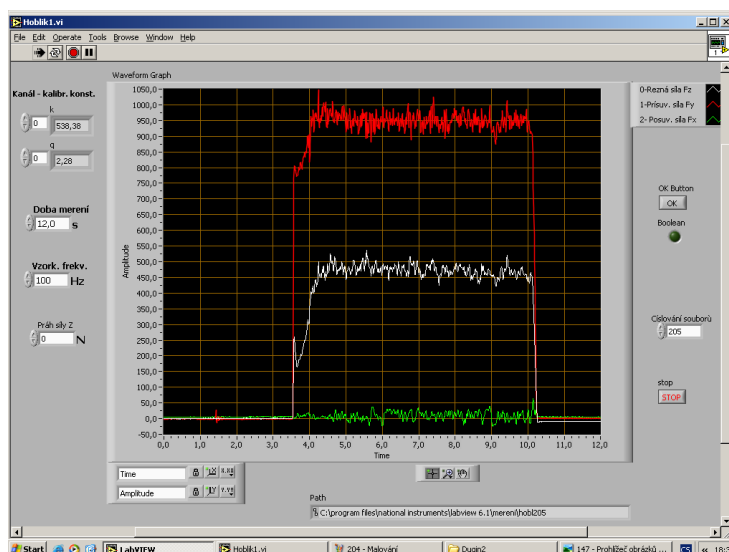
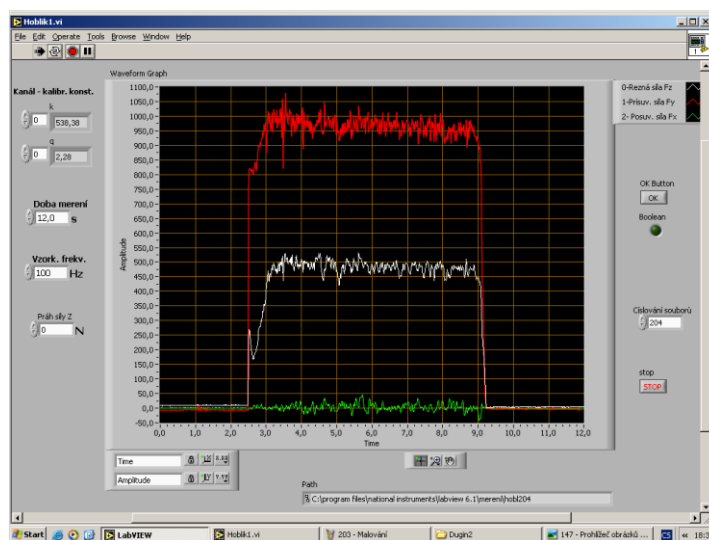
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,225 mm. ap = 0,075 mm.

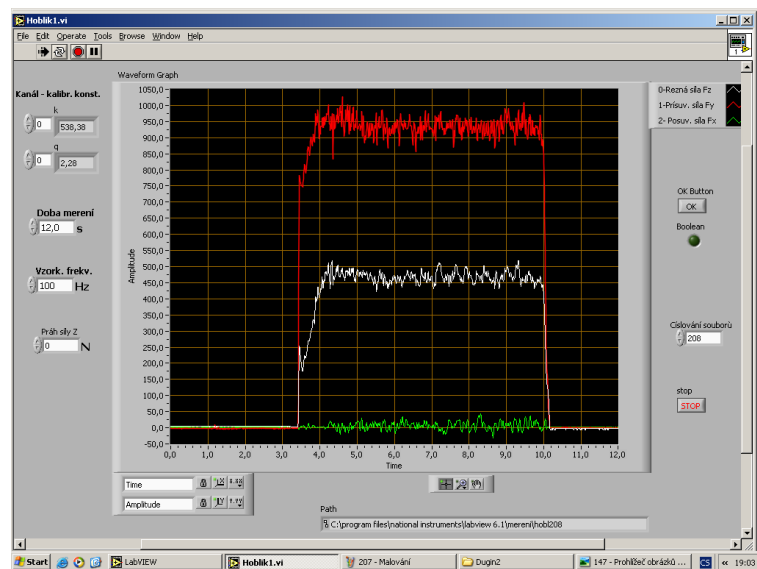
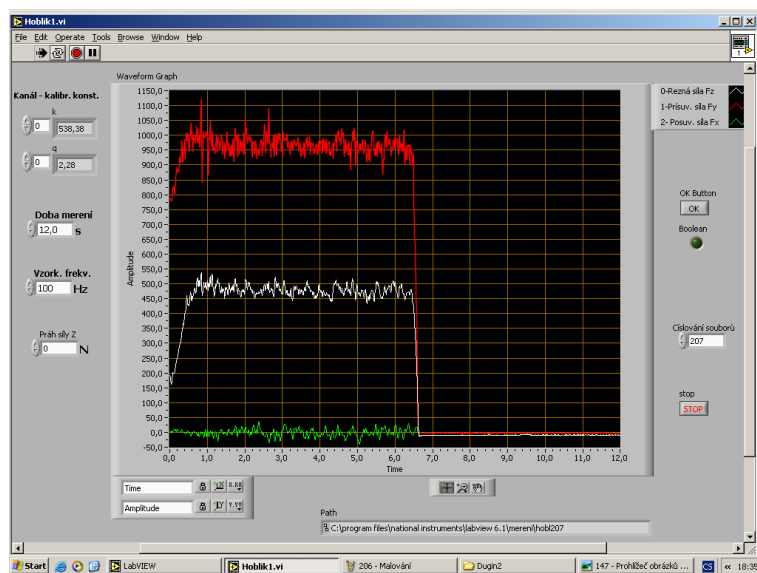
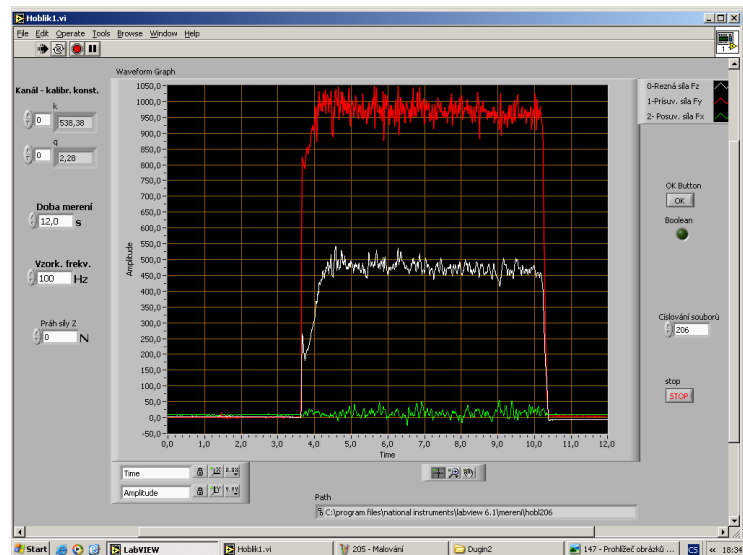




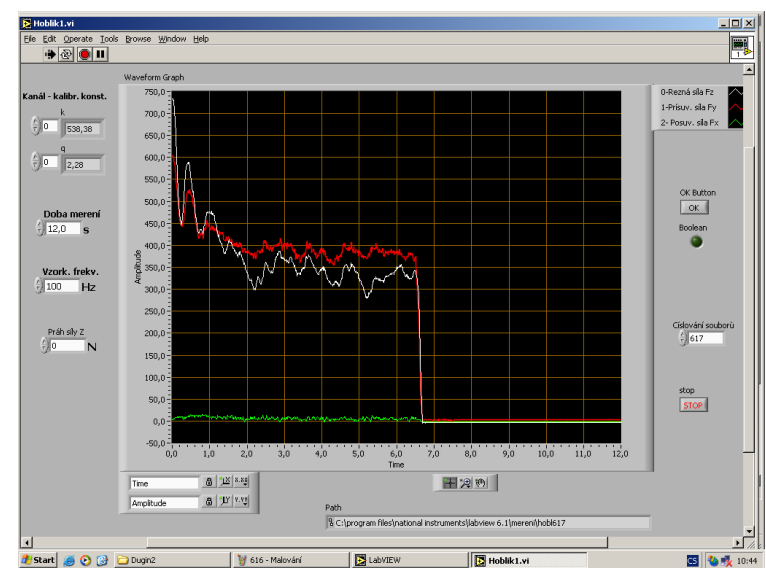
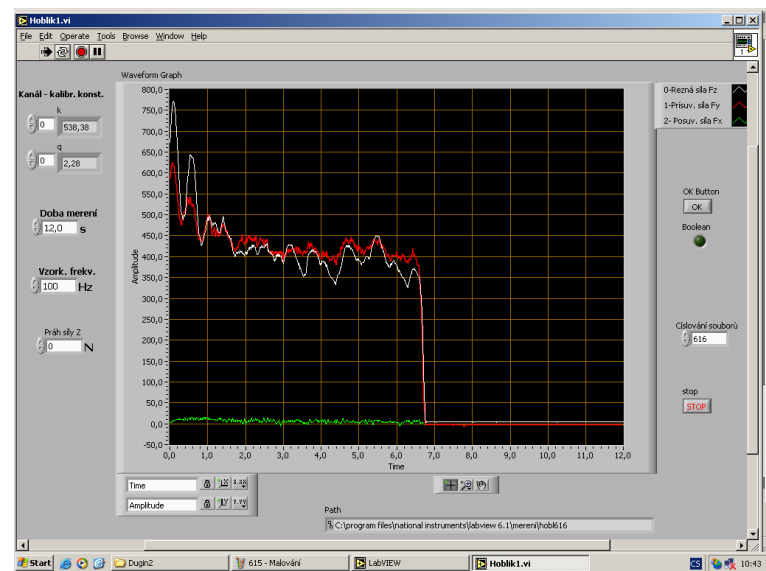
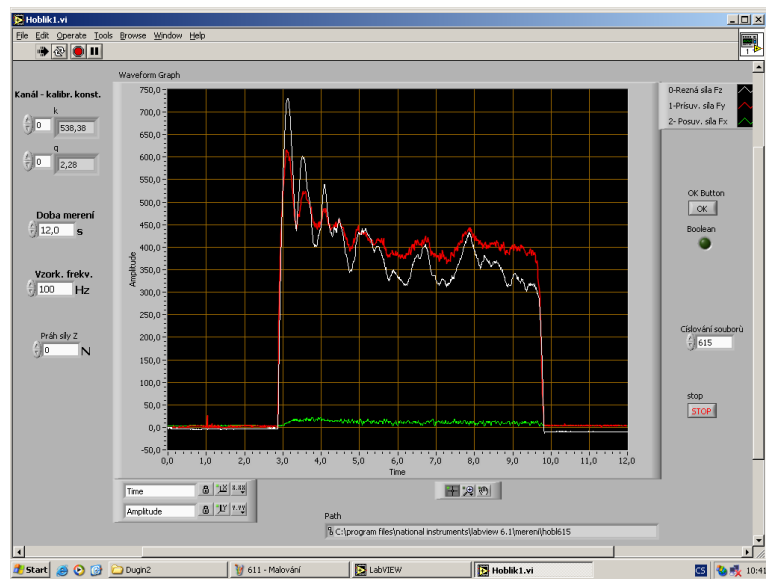


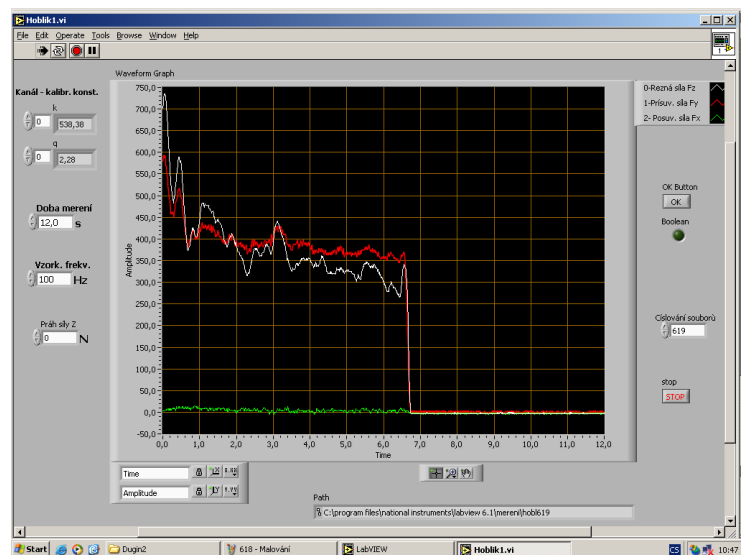
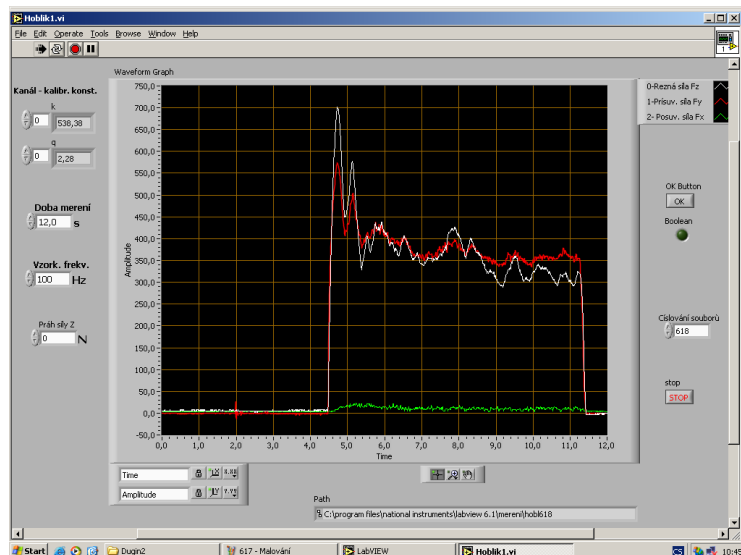
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,225 mm. ap = 0,01 mm.



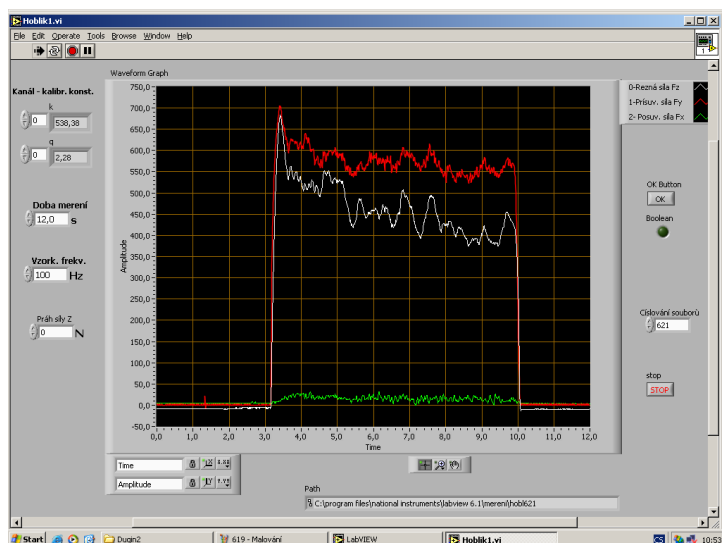


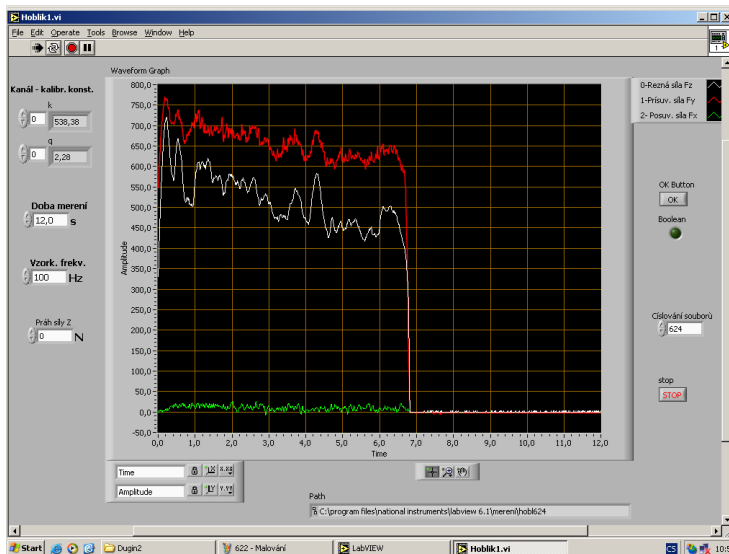
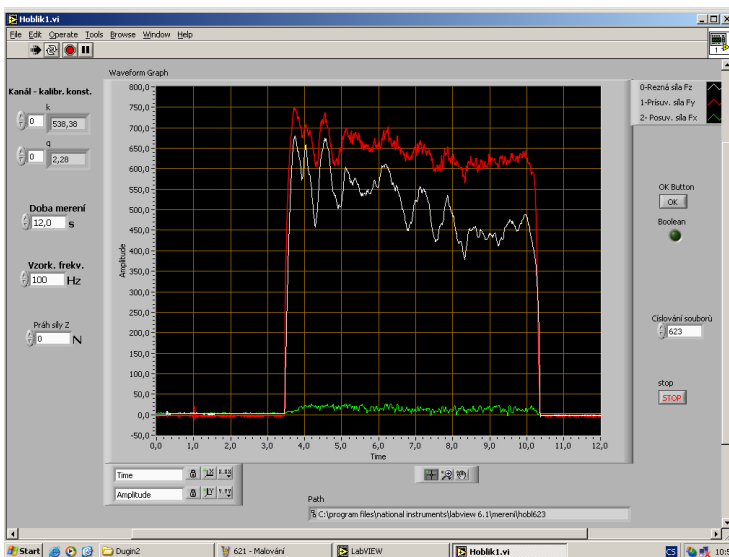
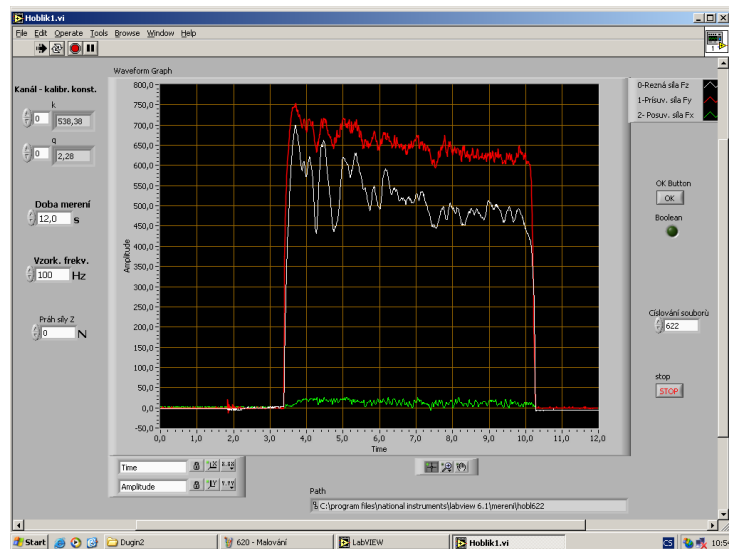
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,35 mm. ap = 0,025 mm.

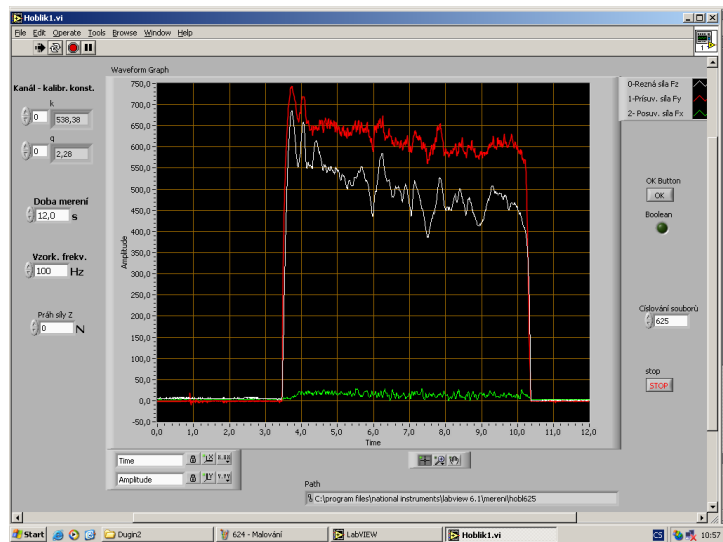




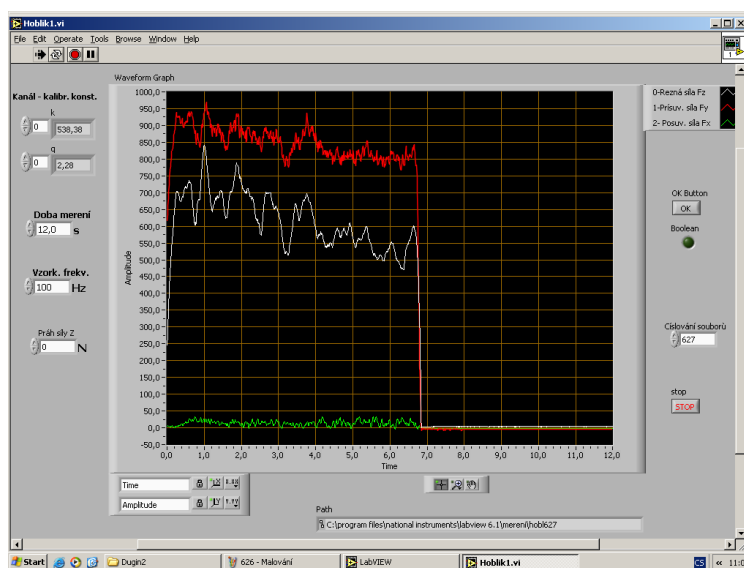
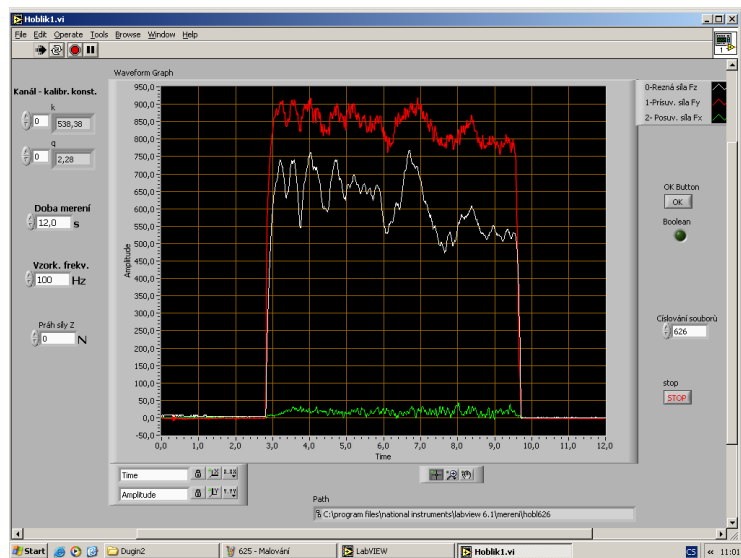
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,35 mm. ap = 0,05 mm.

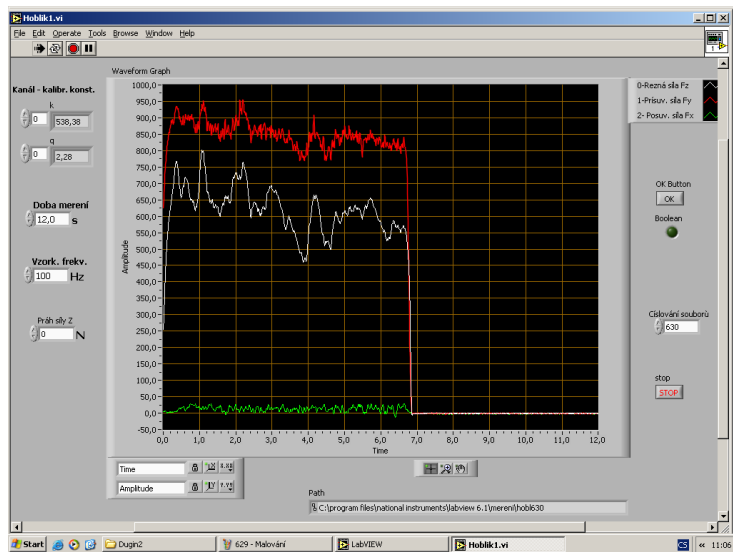
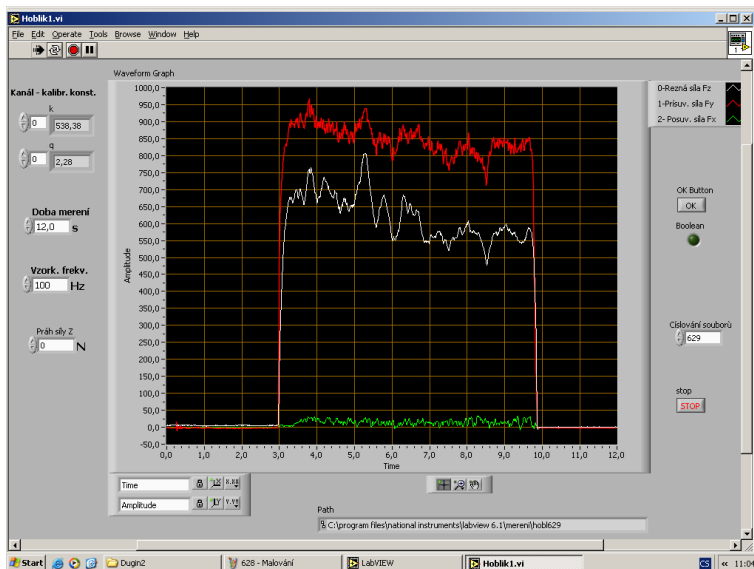
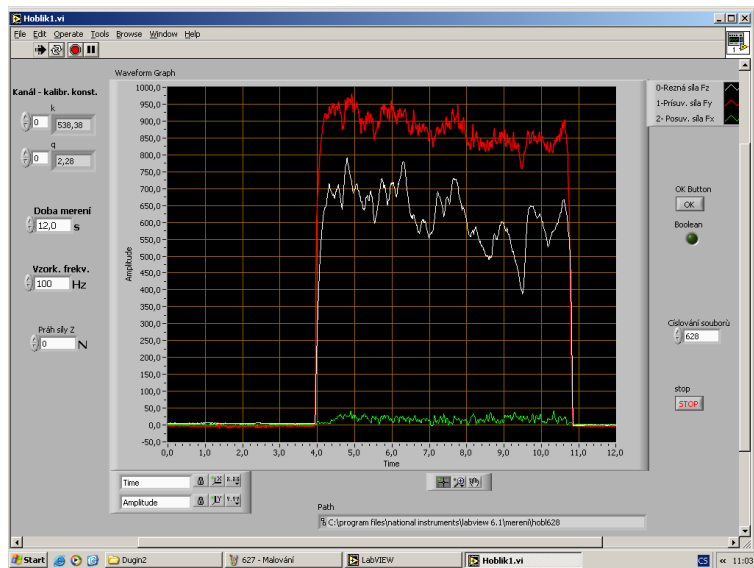




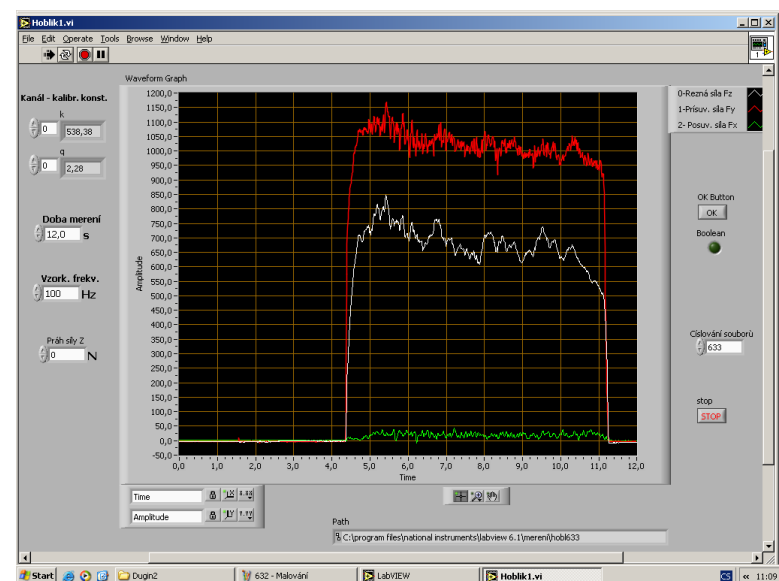
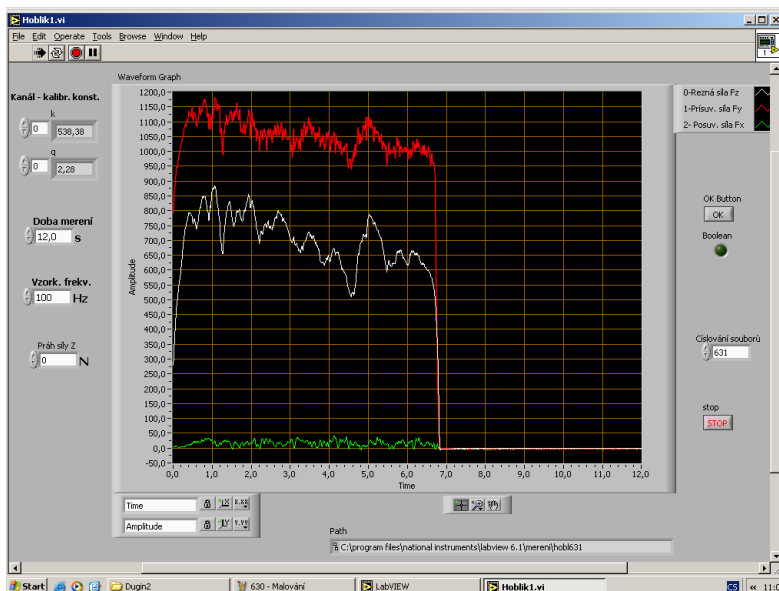
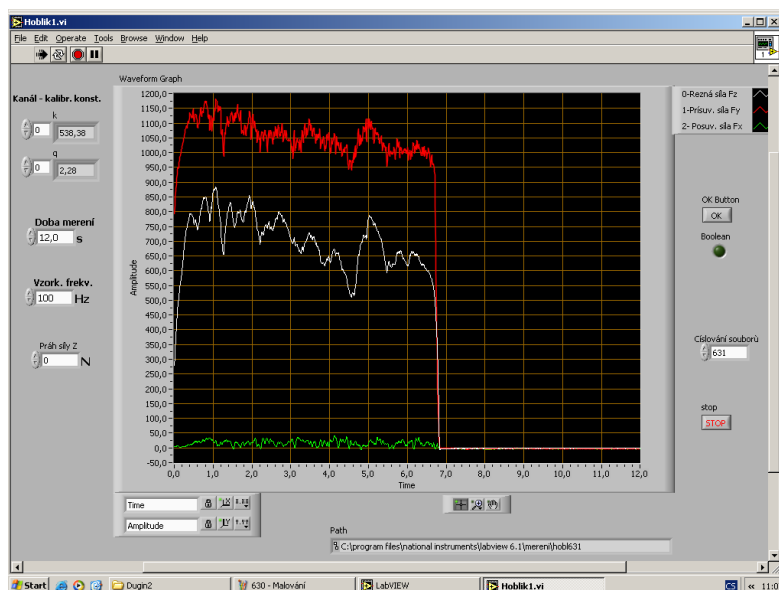


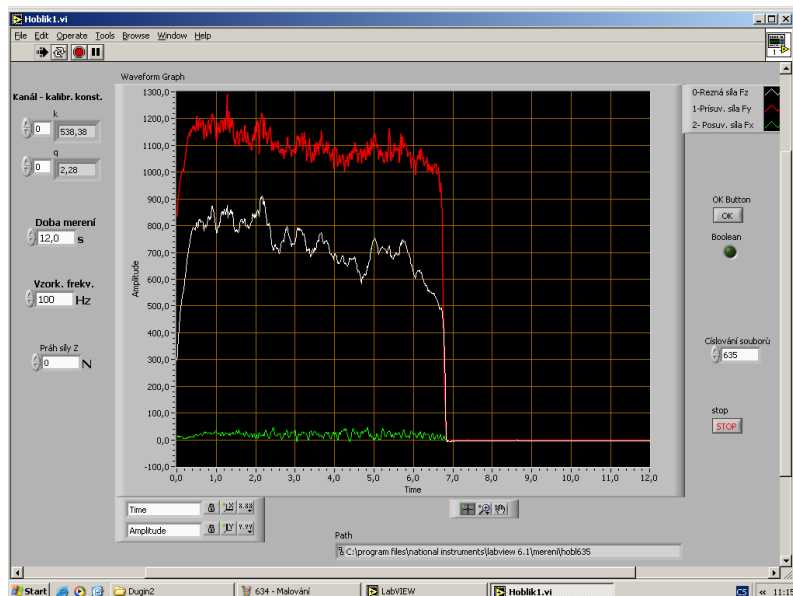
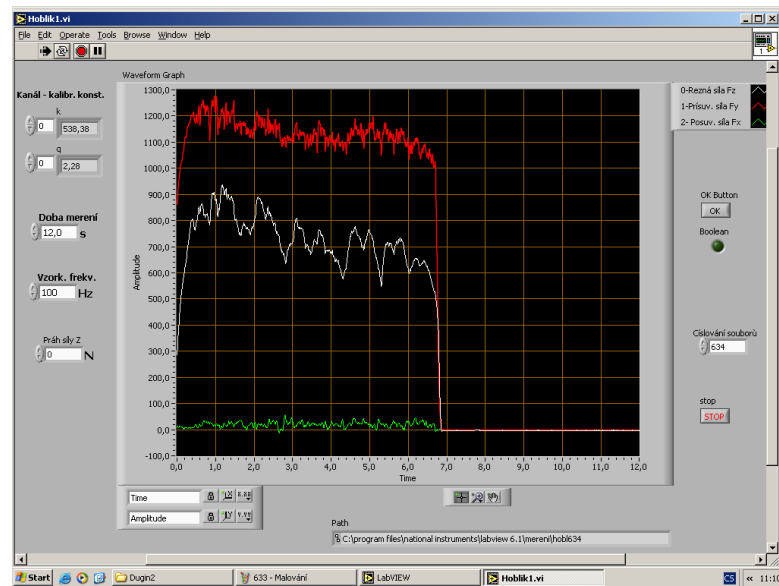
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,35 mm. ap = 0,075 mm.



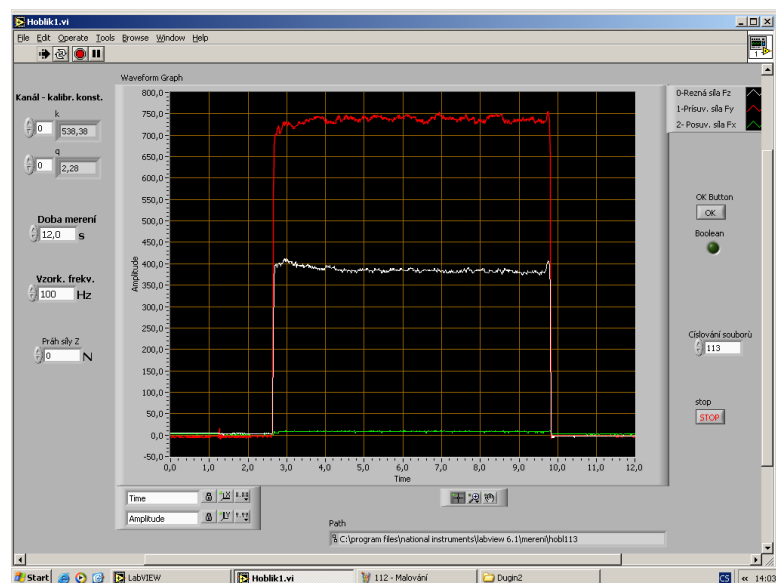


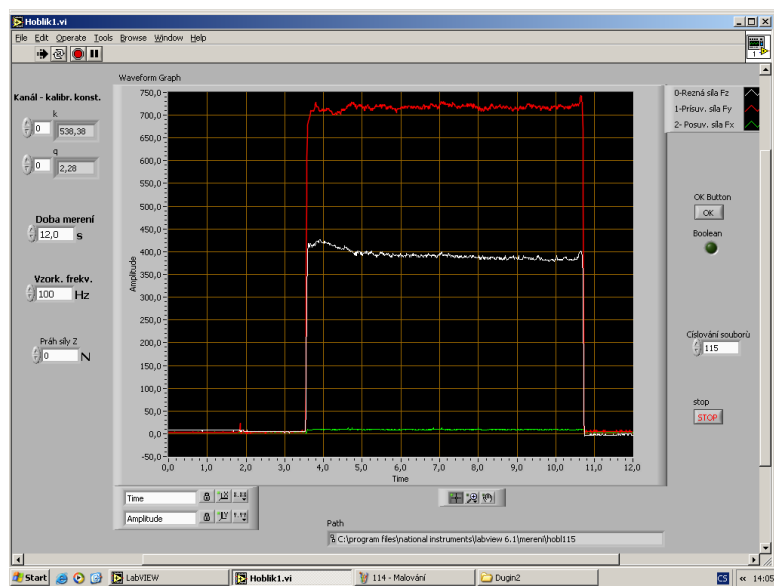
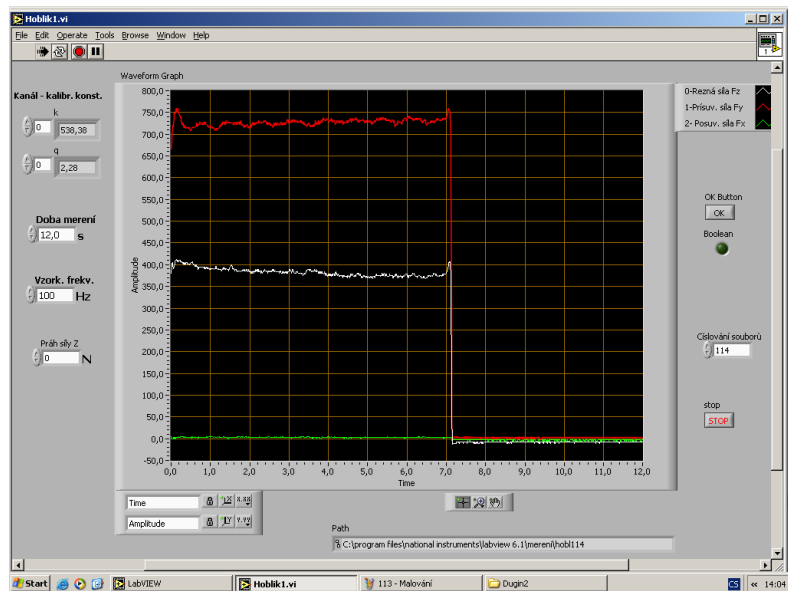
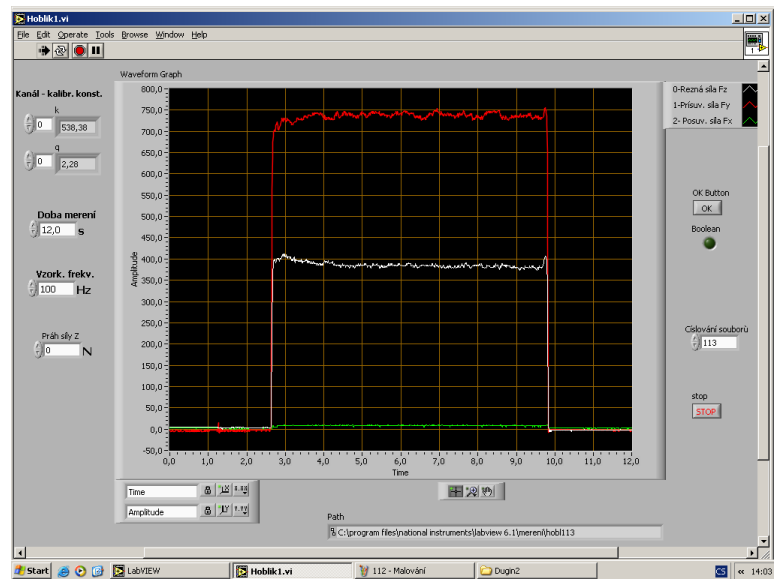
Slitina hliníku 42 4222. VB = 0,35 mm. ap = 0,1 mm.

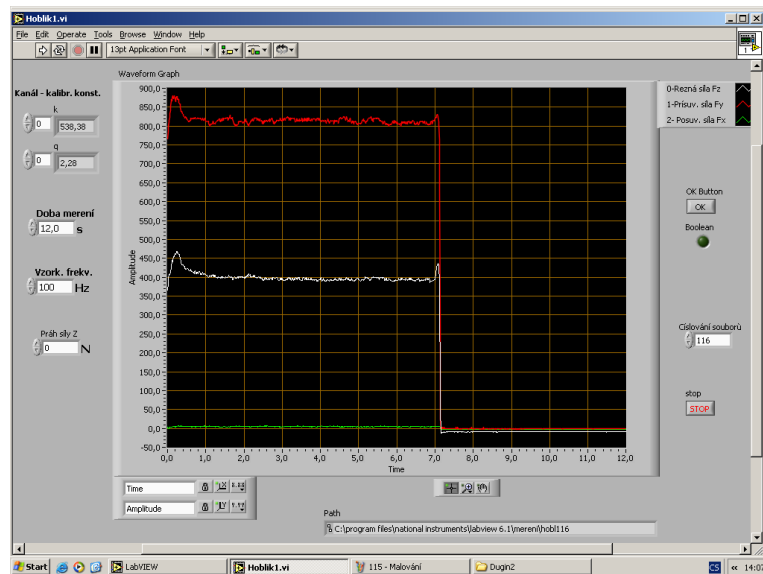




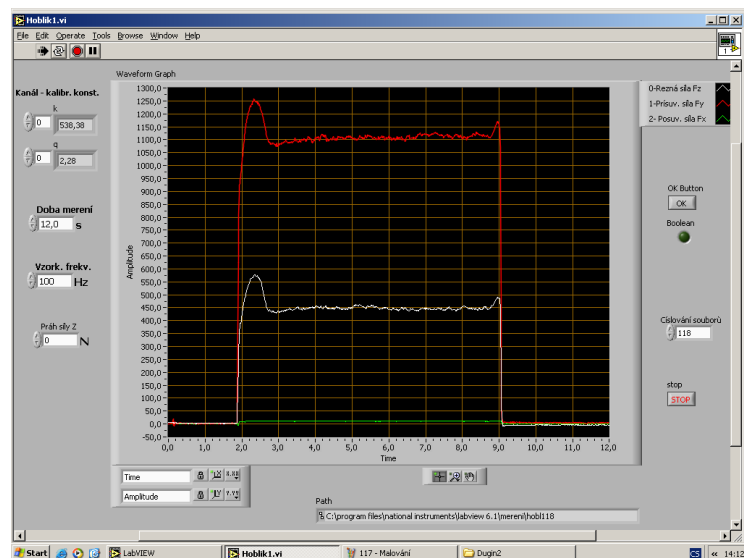
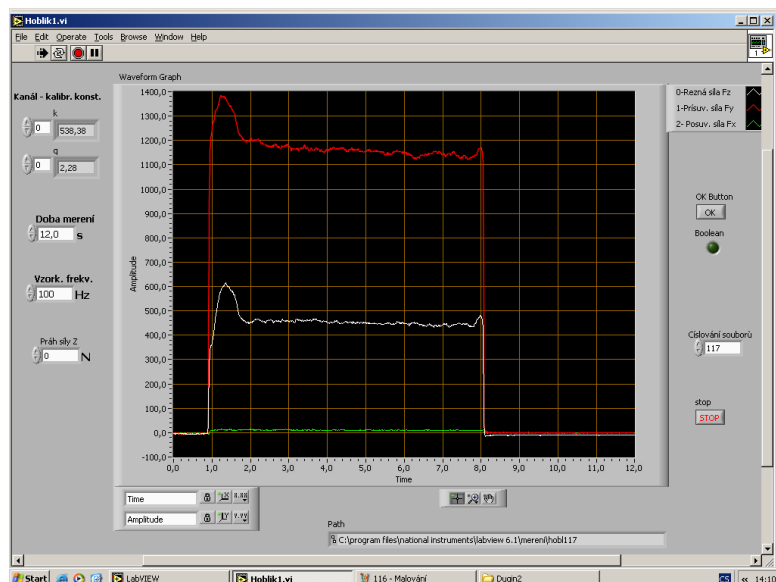
Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,03 mm. ap = 0,025 mm.

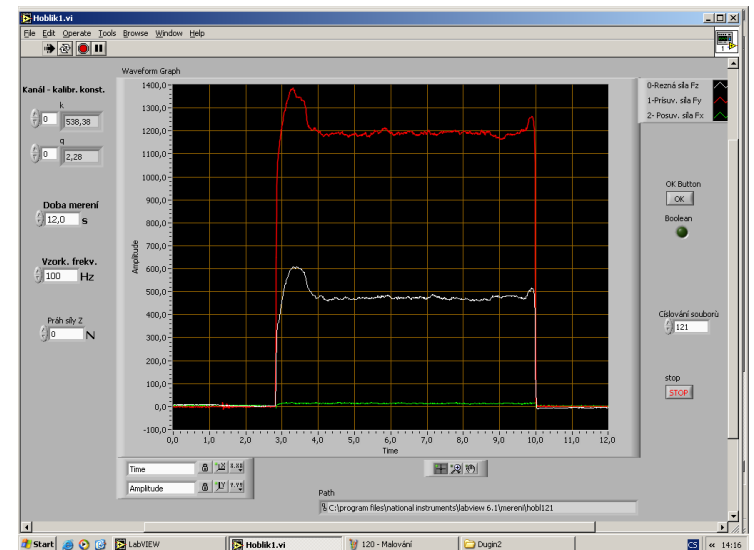
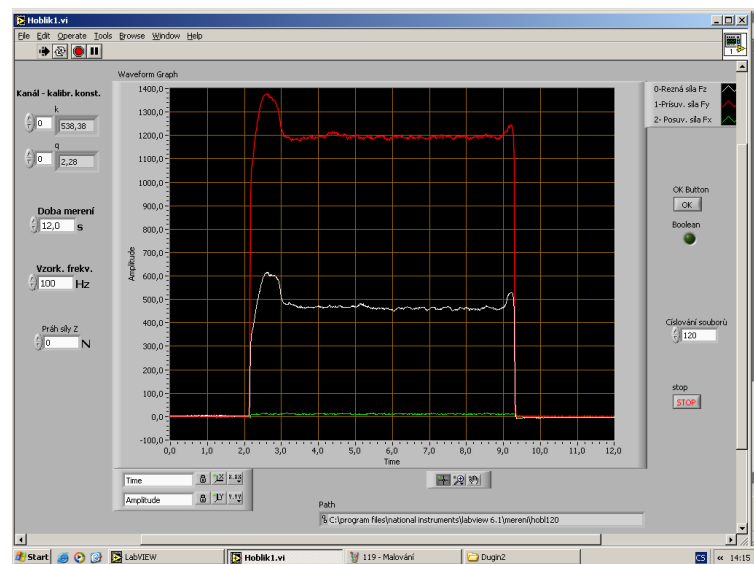
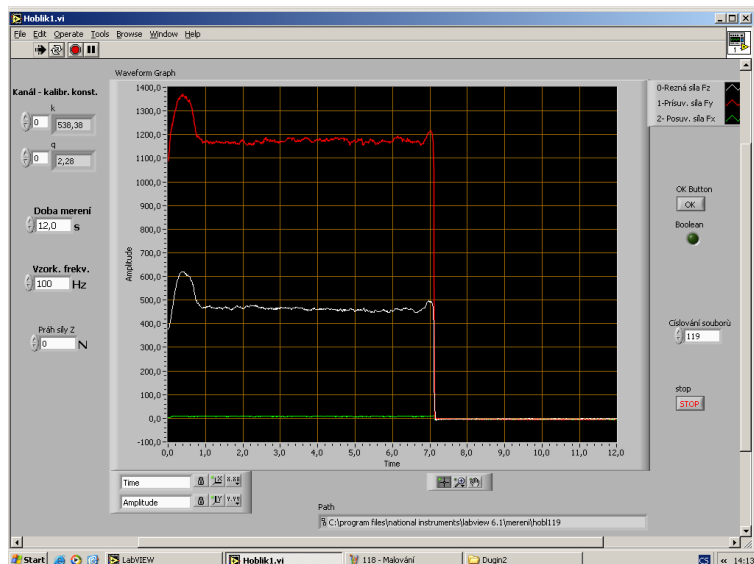




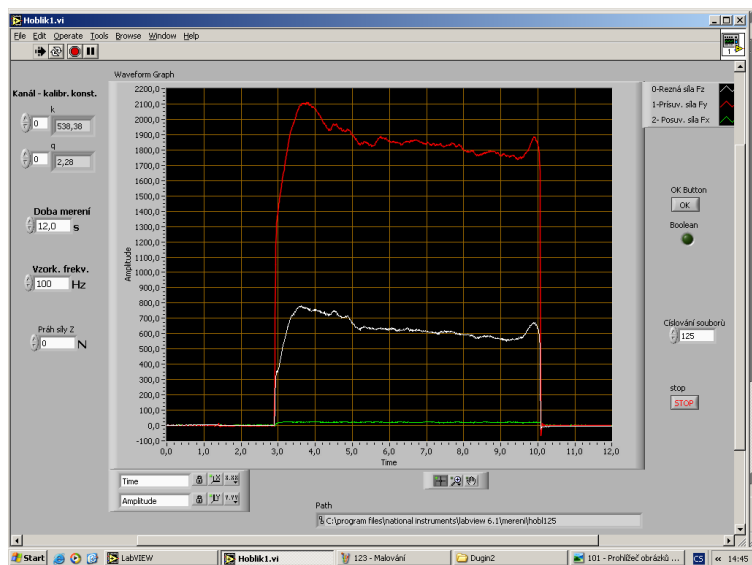
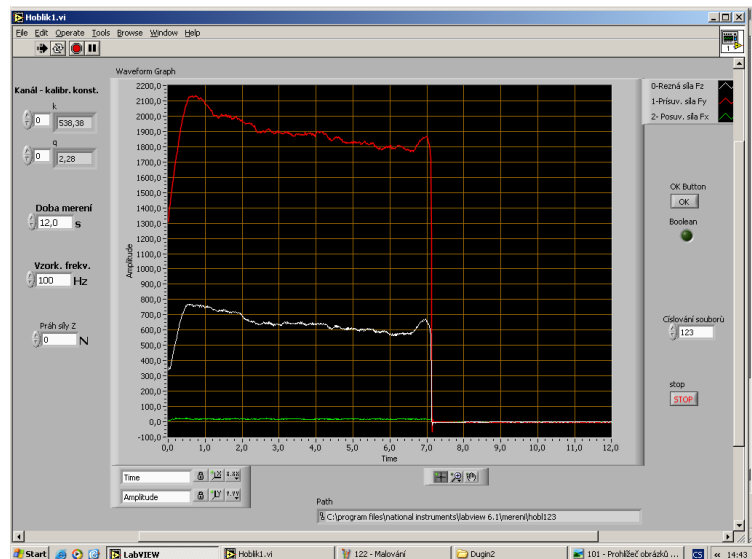
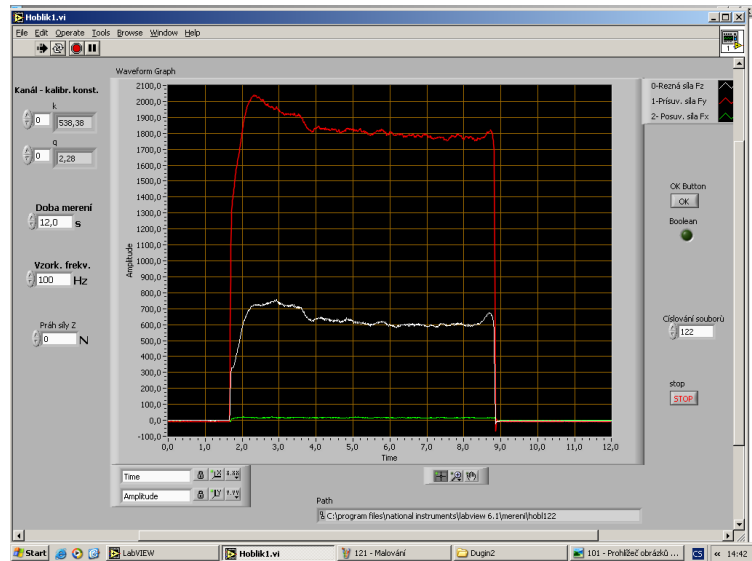


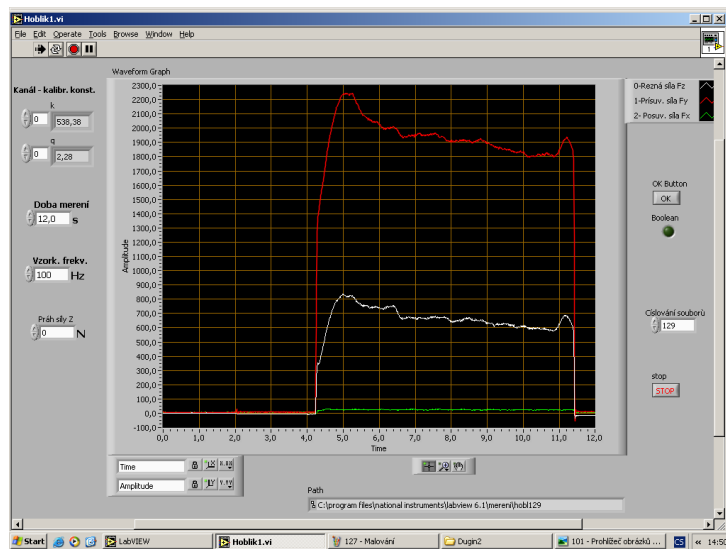
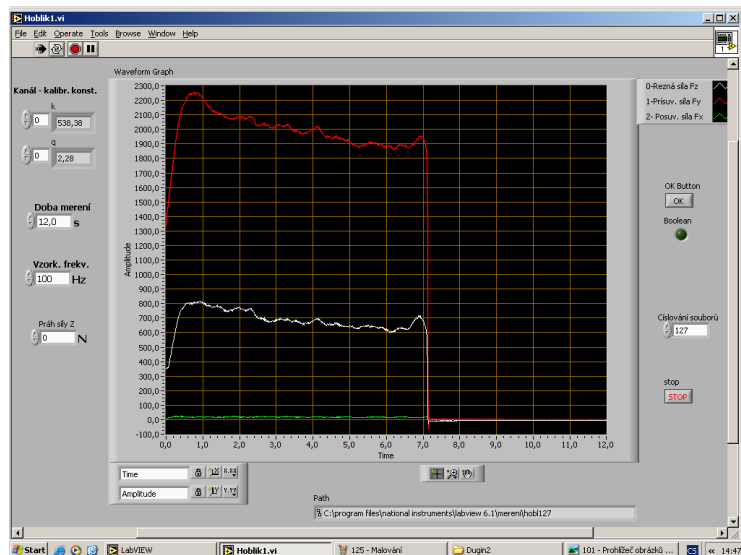
Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,03 mm. ap = 0,05 mm.



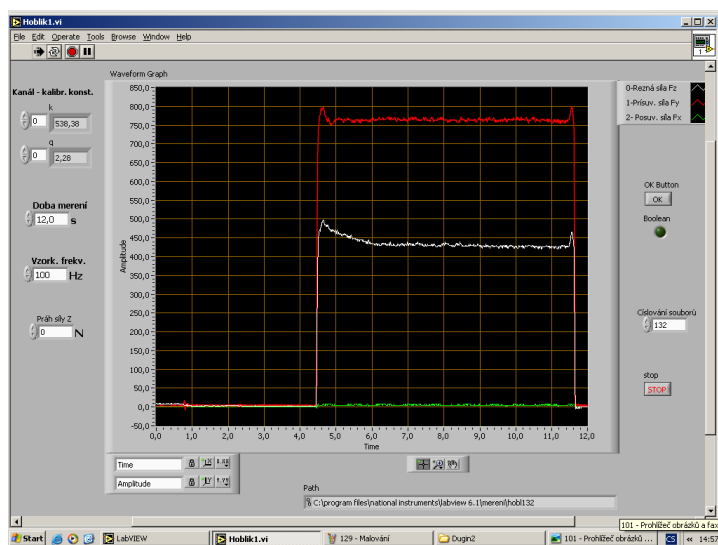


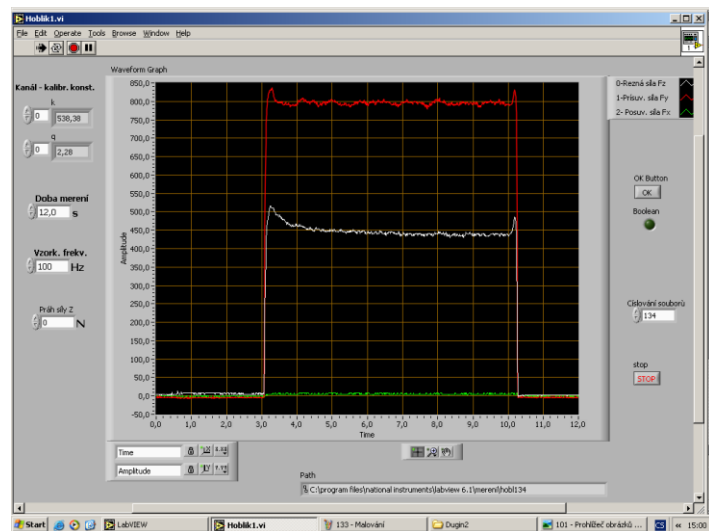
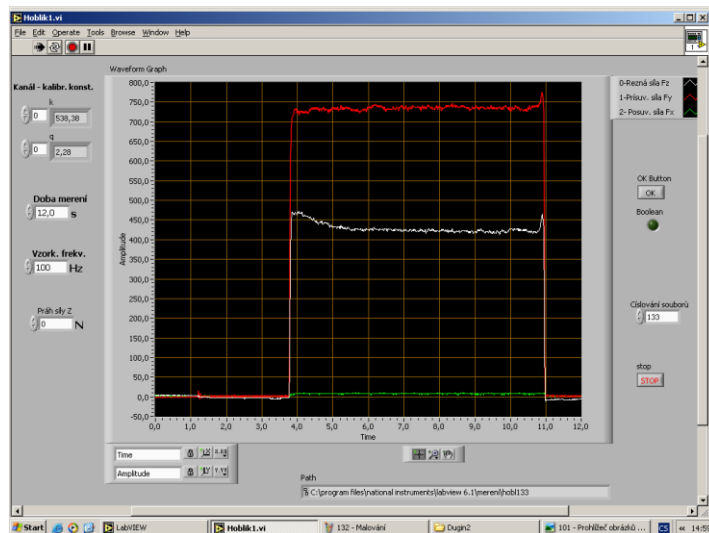
Konstrukční ocel 12 050.1. $V_B = 0,03 \text{ mm}$. $a_p = 0,075 \text{ mm}$.



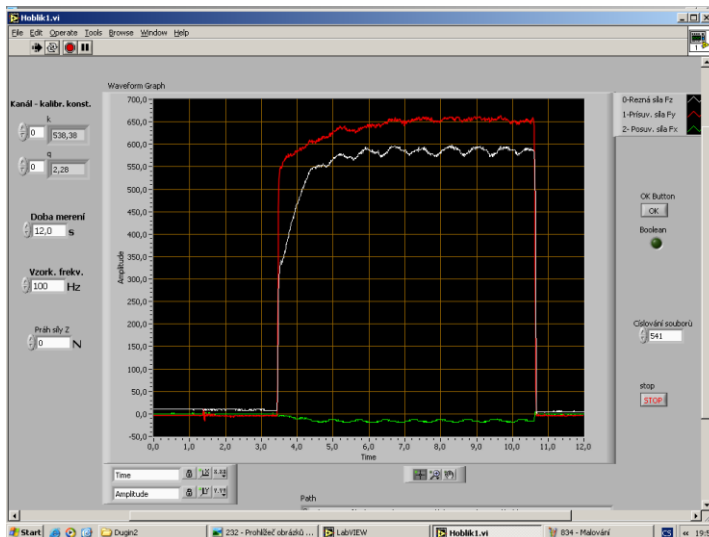


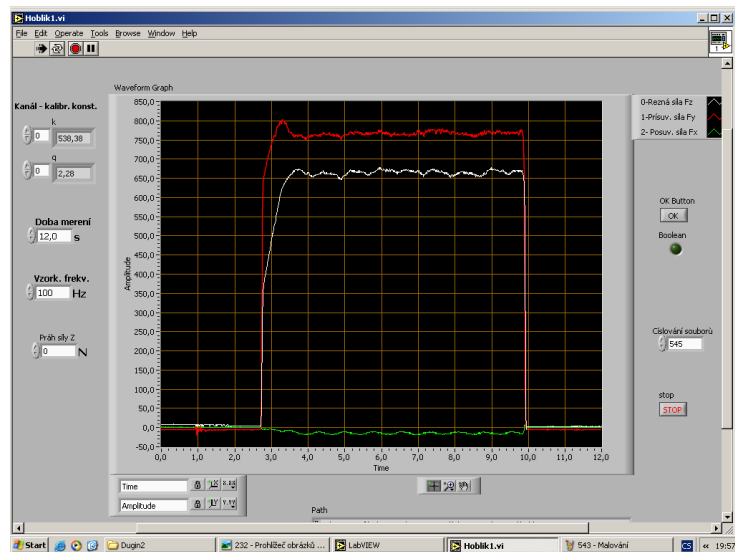
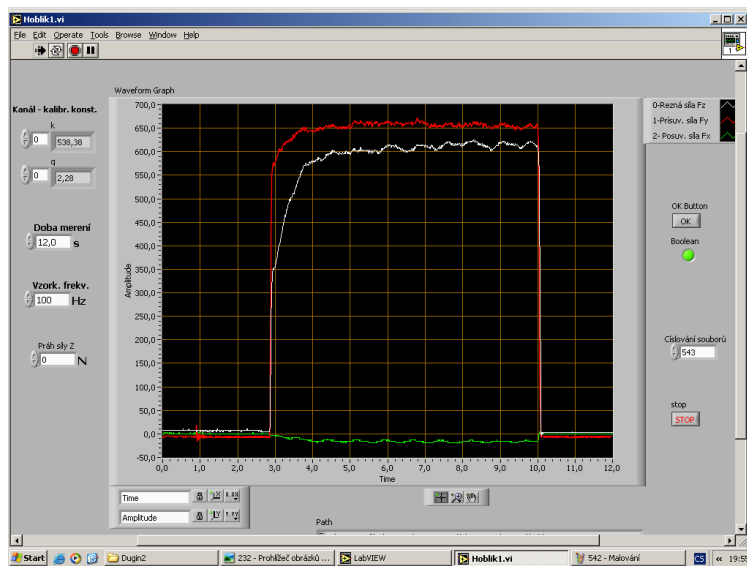
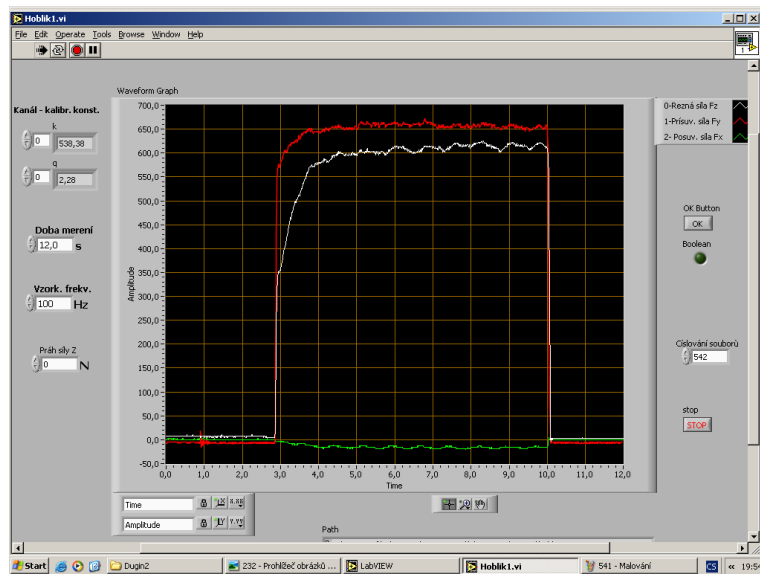
Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,03 mm. ap = 0,1 mm.

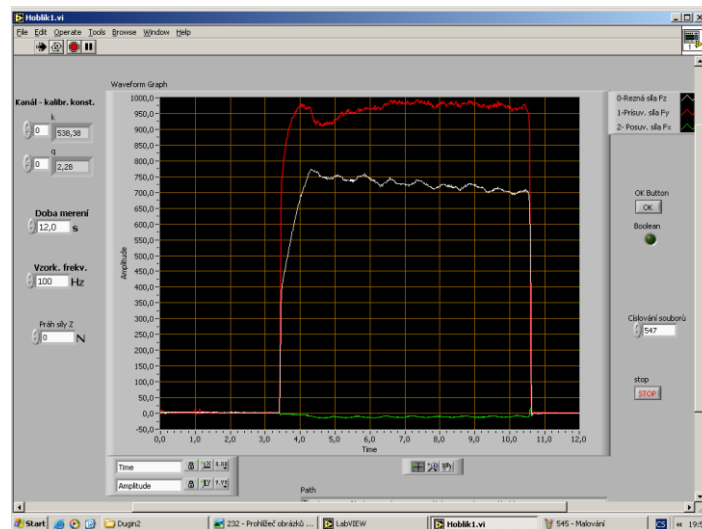




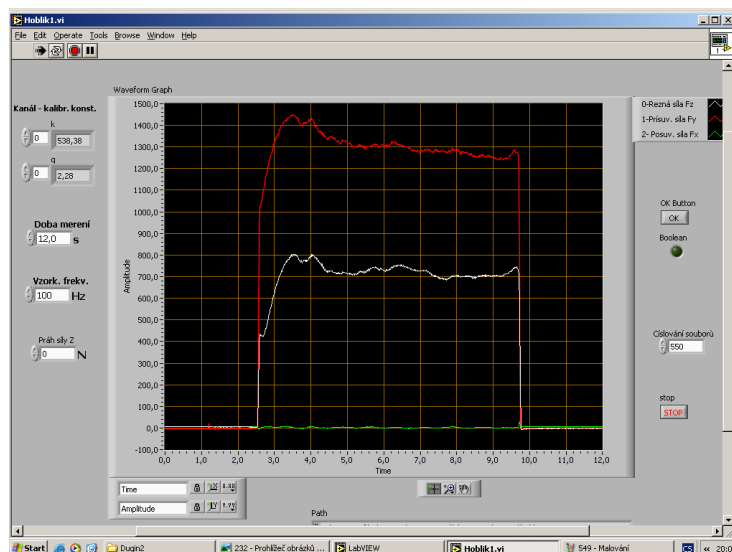
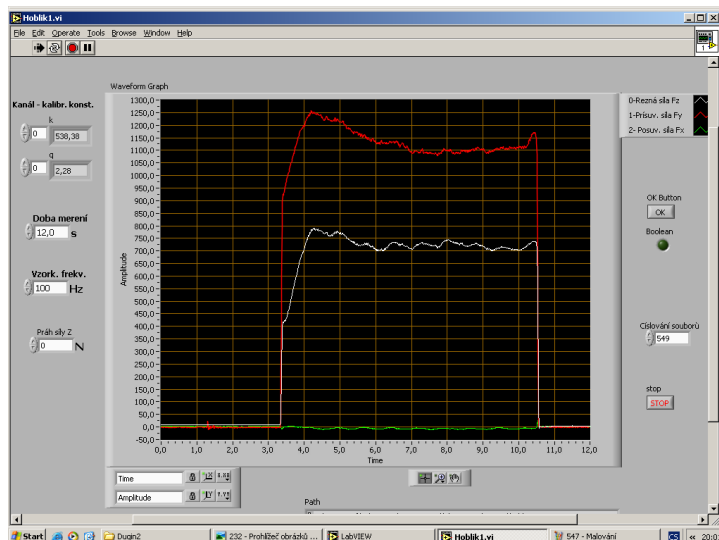
Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,15 mm. ap = 0,025 mm.

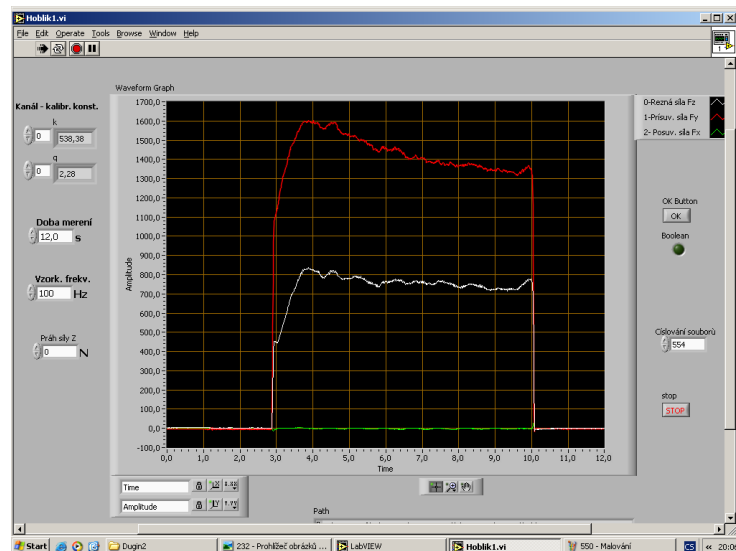




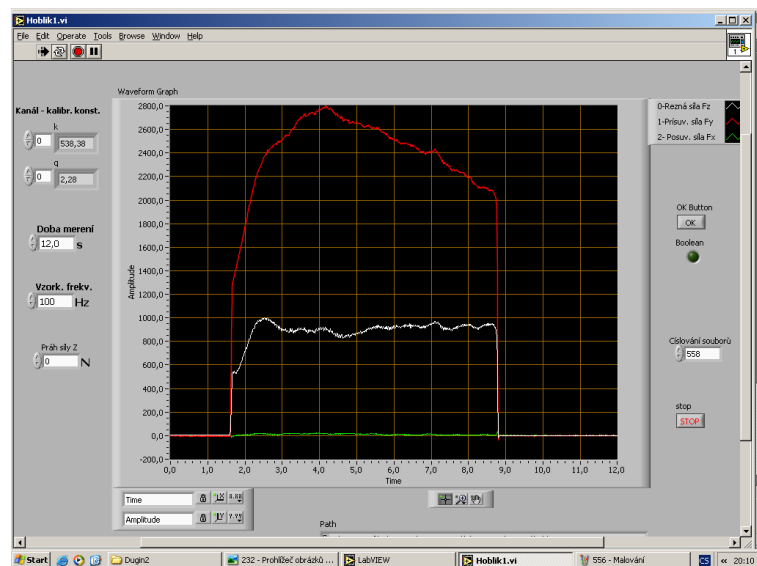
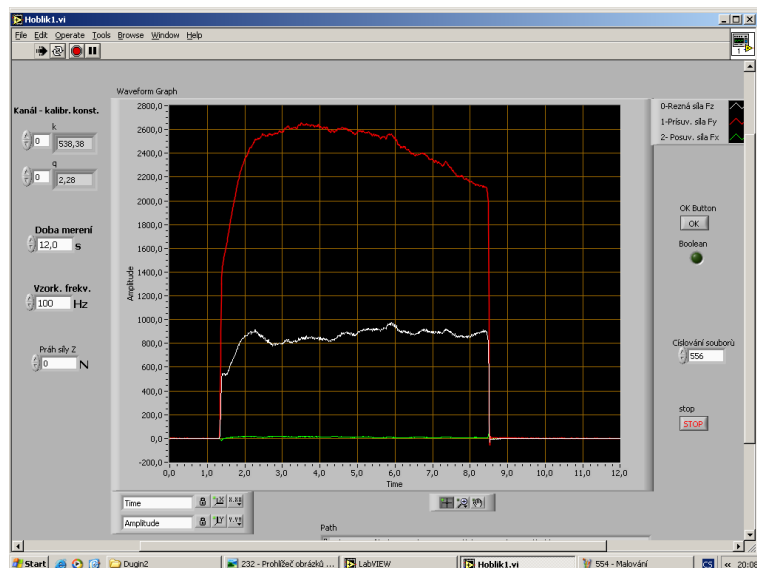


Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,15 mm. ap = 0,05 mm.

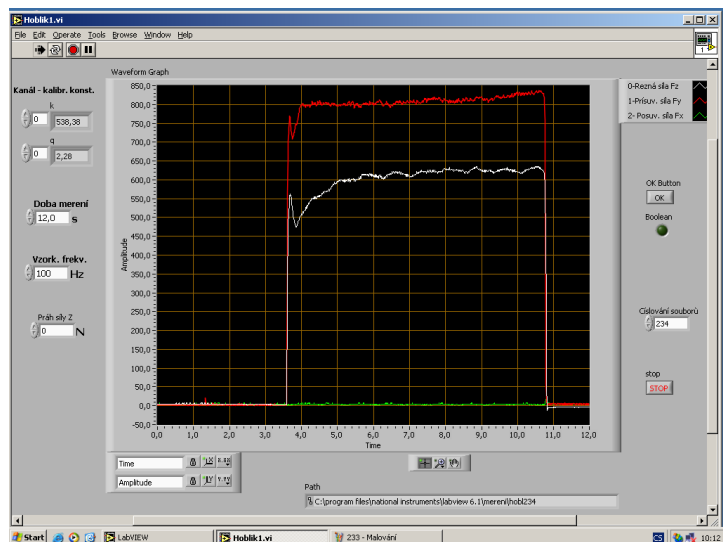
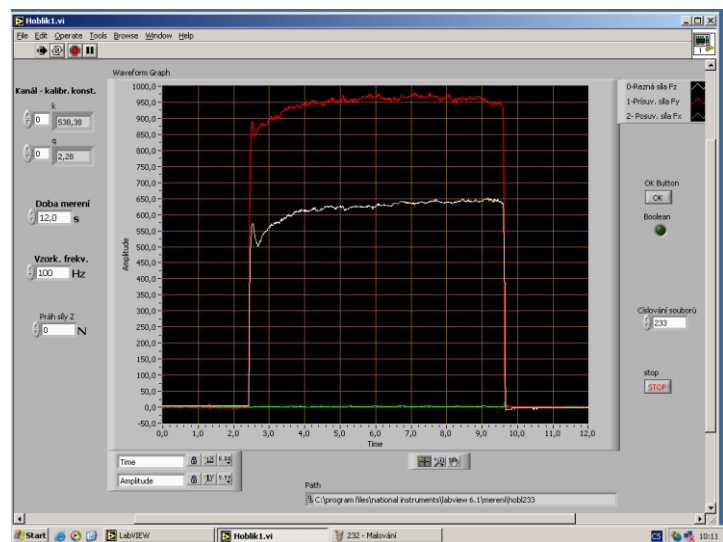
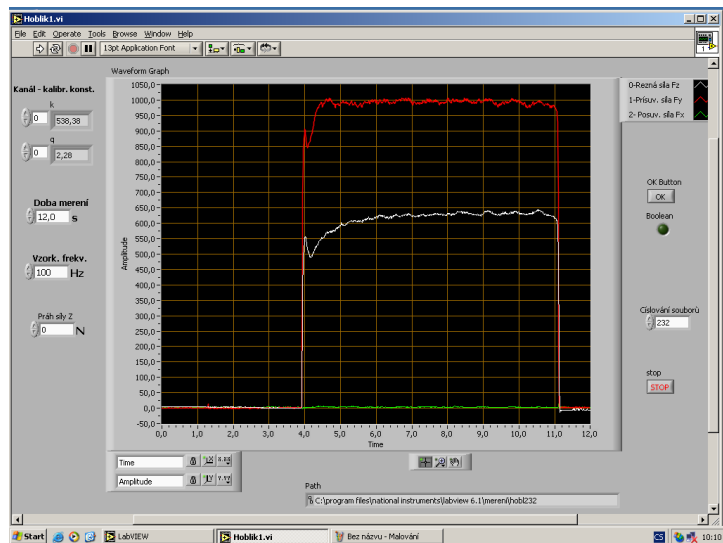


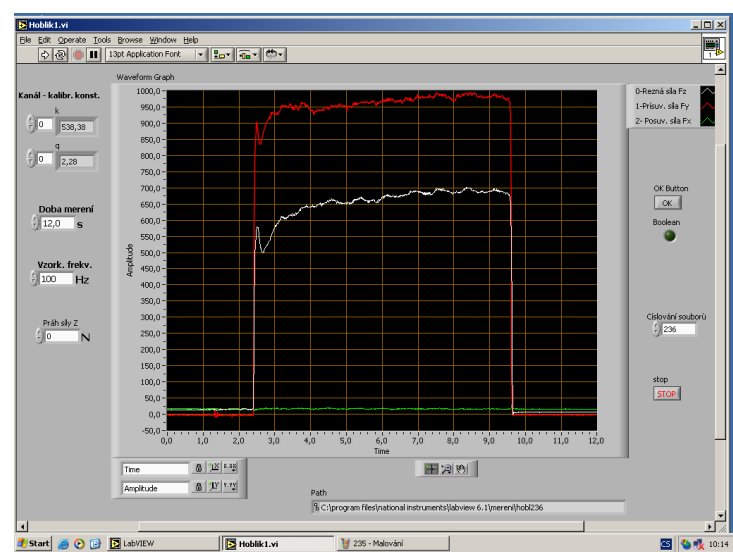
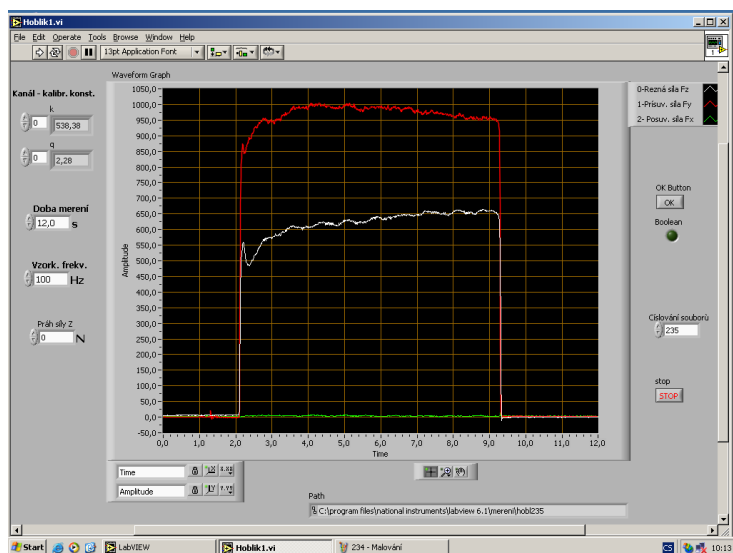


Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,15 mm. ap = 0,05 mm.

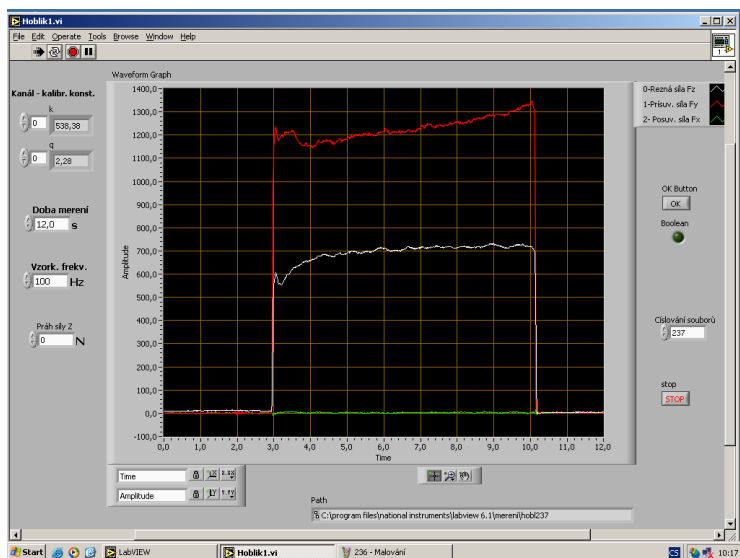


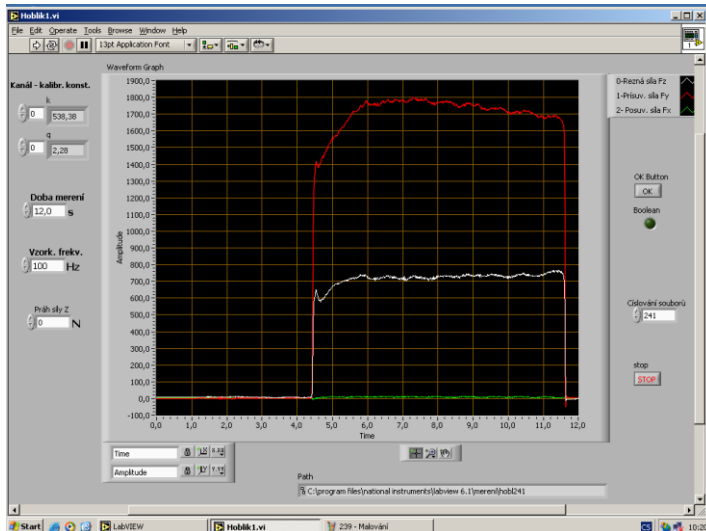
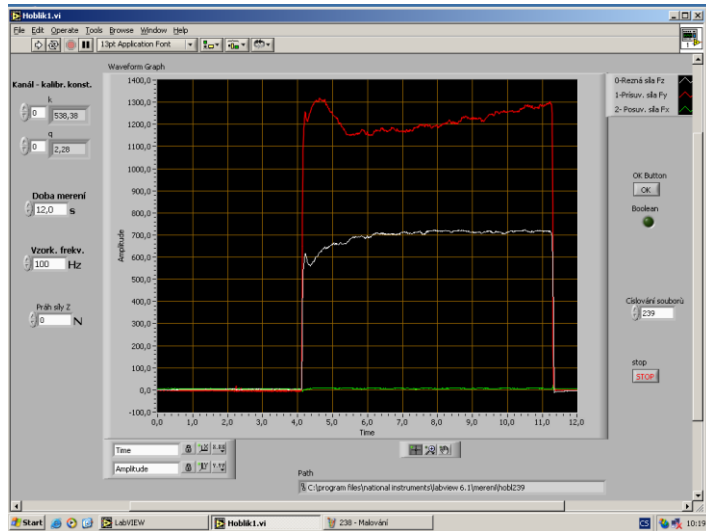
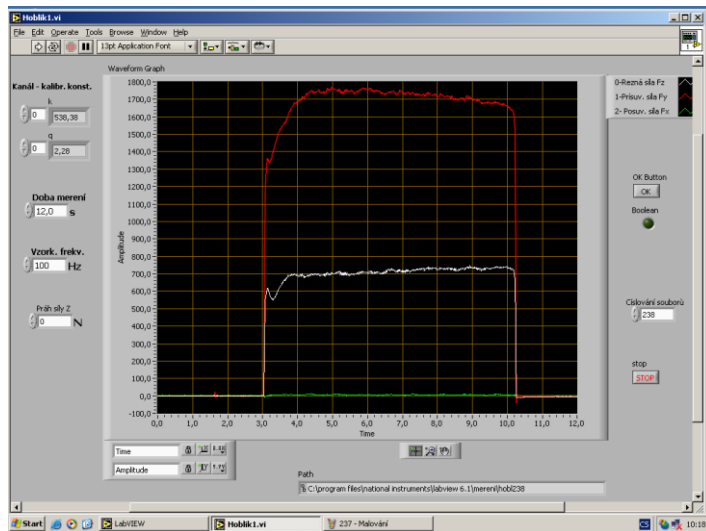
Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,225 mm. ap = 0,025 mm.

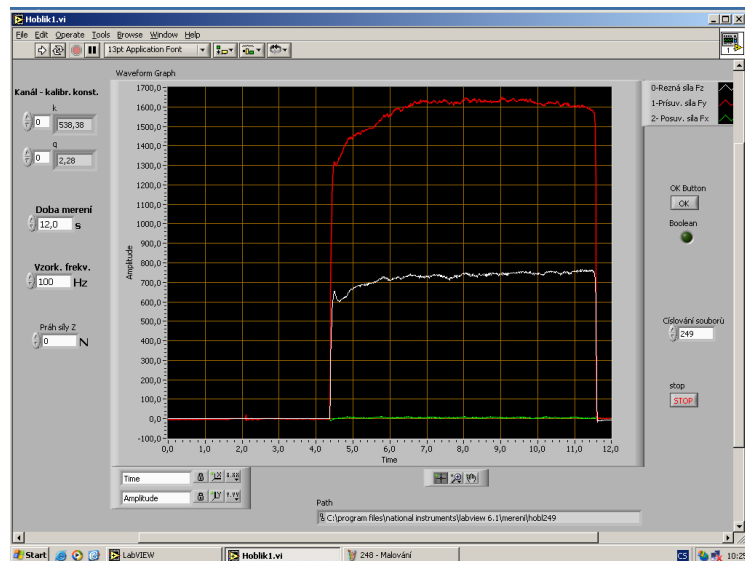
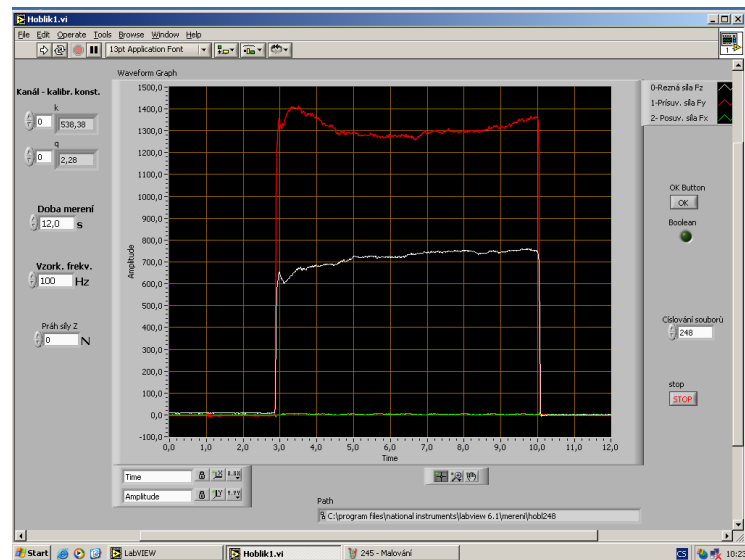
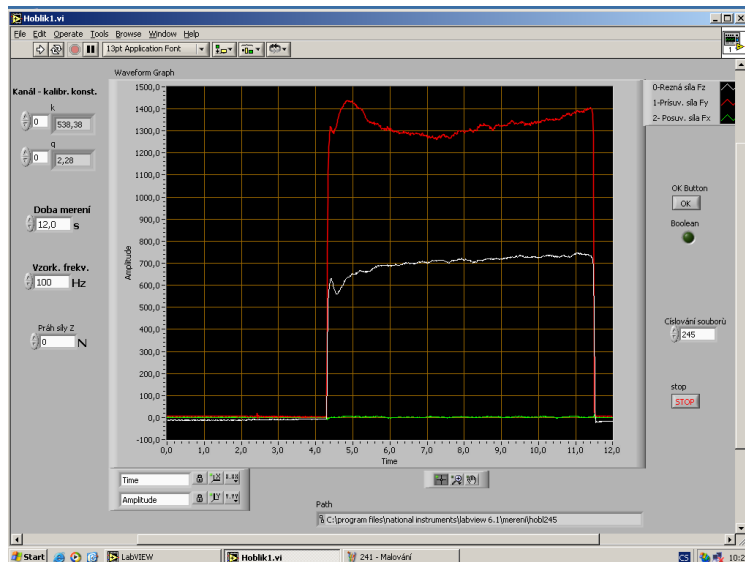




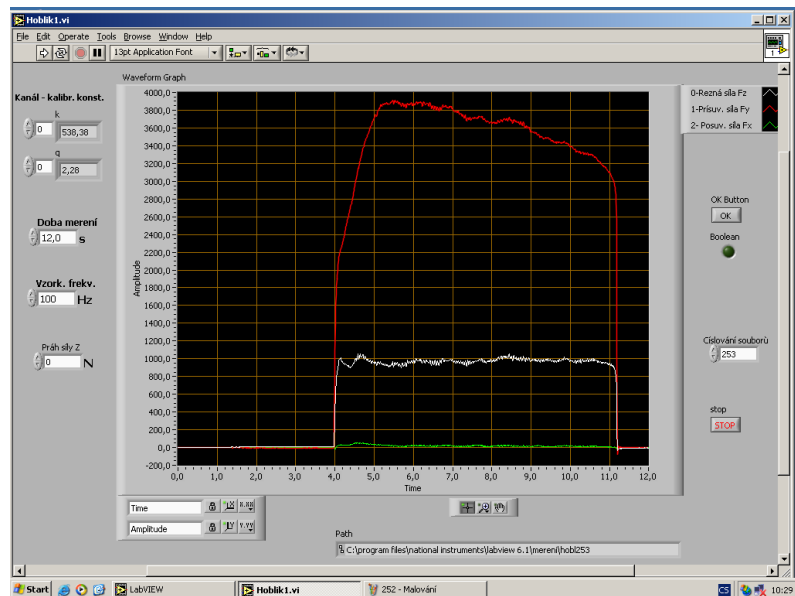
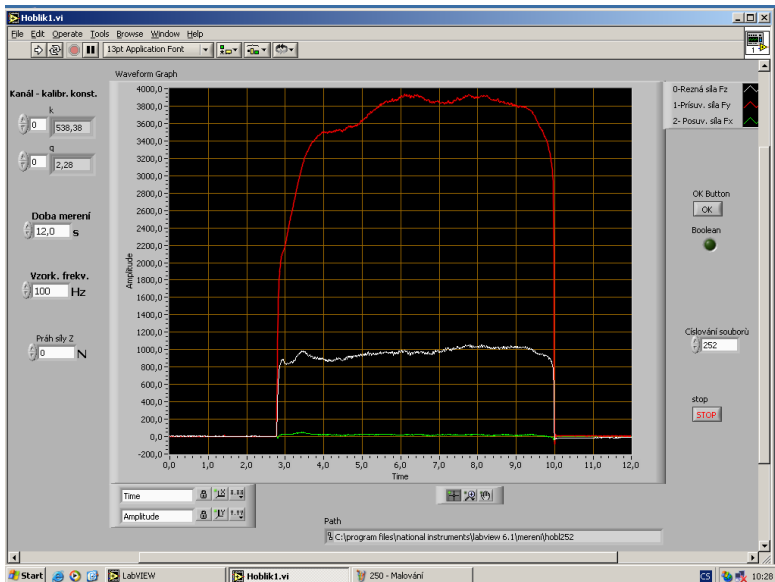
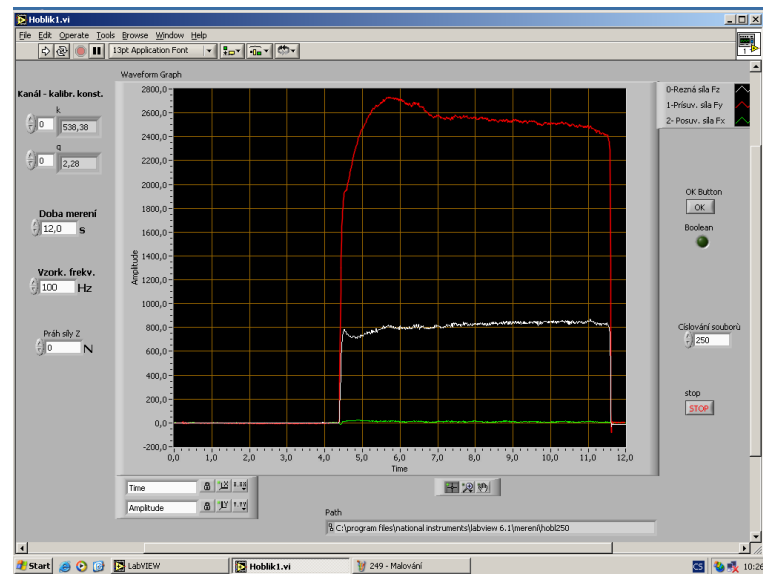
Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,225 mm. ap = 0,05 mm.

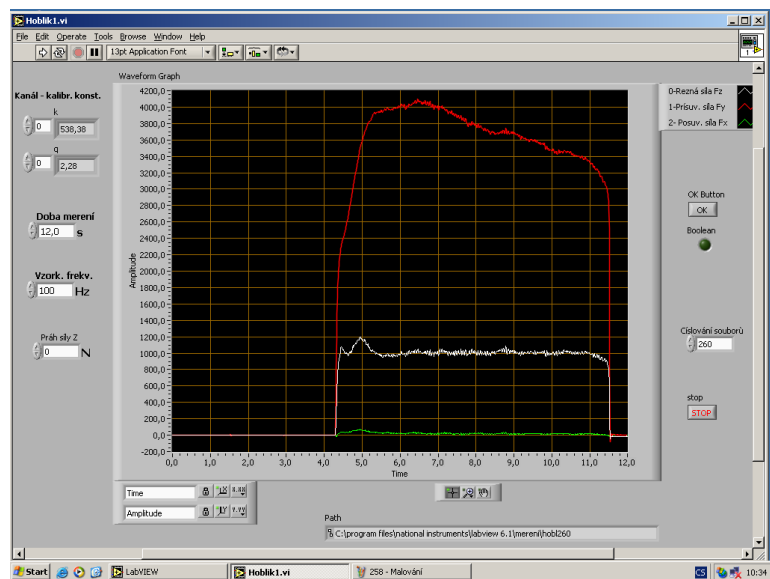
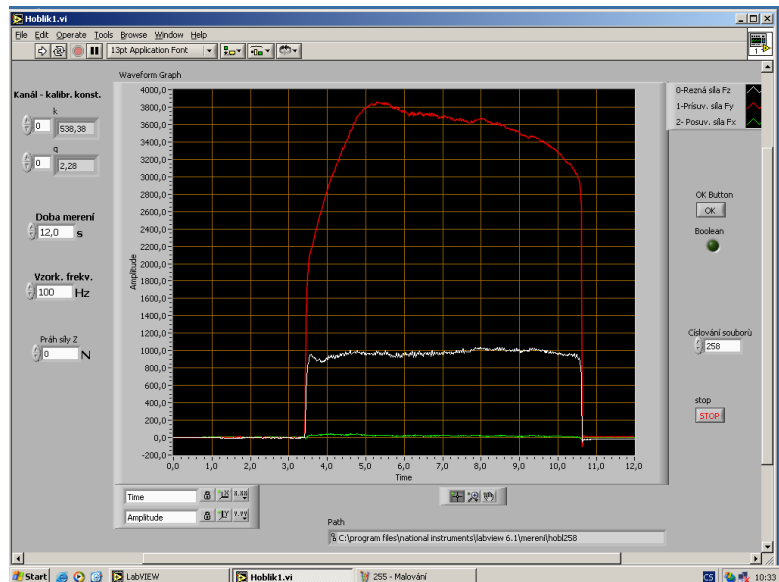
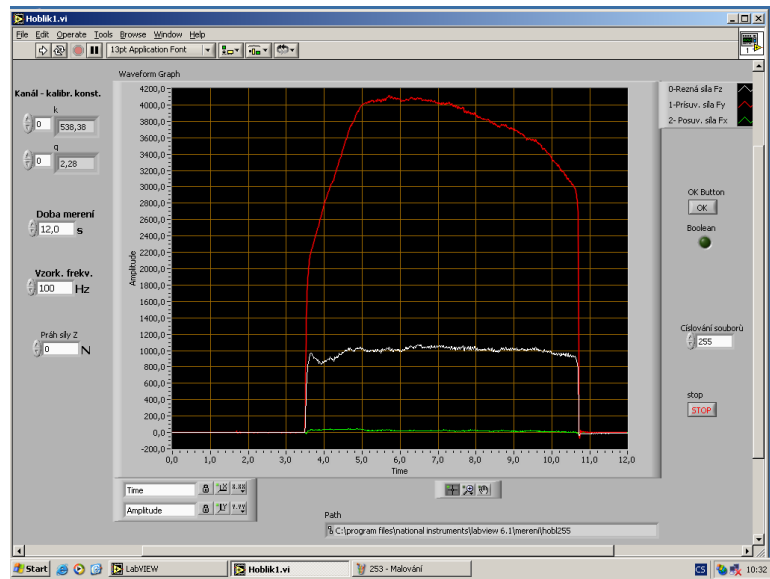




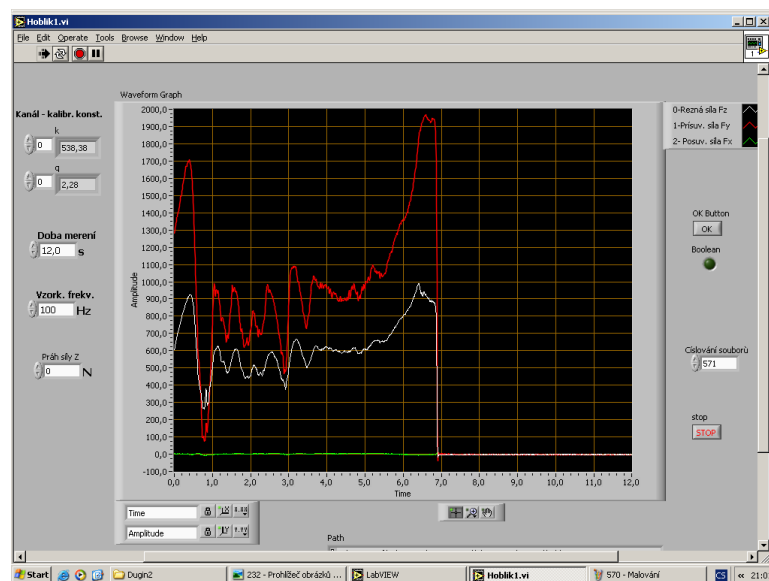
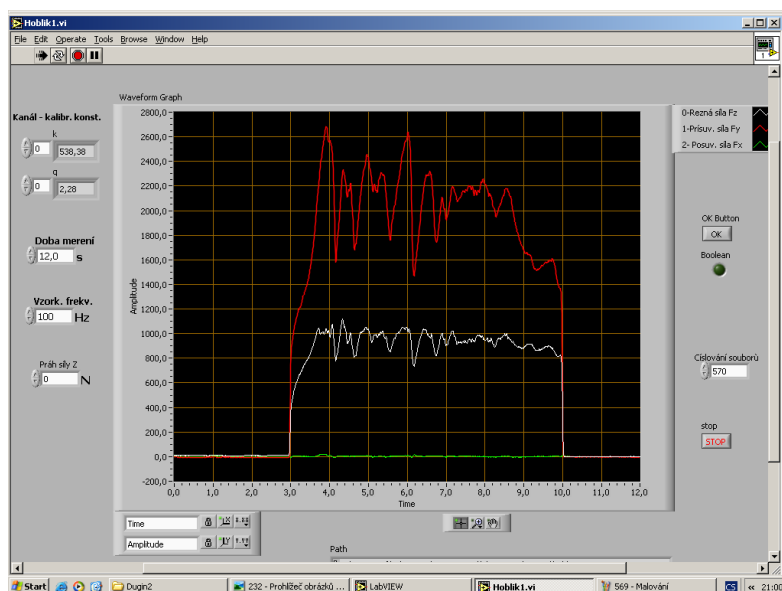
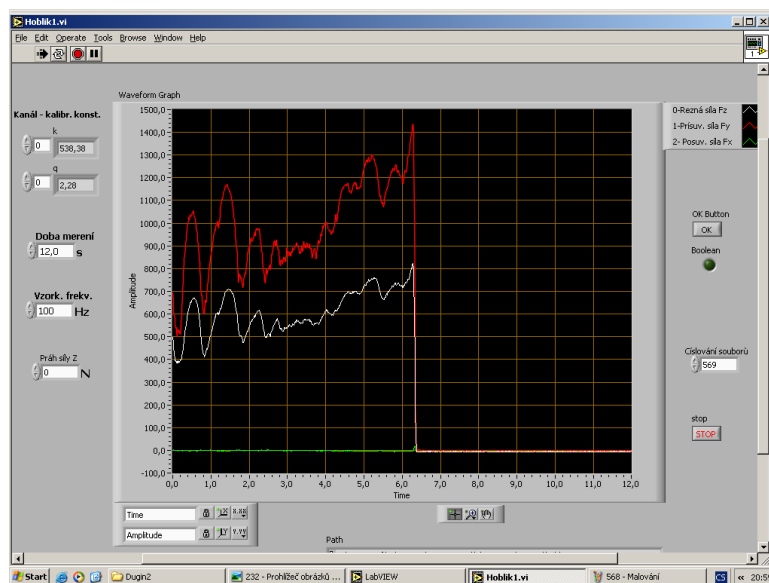


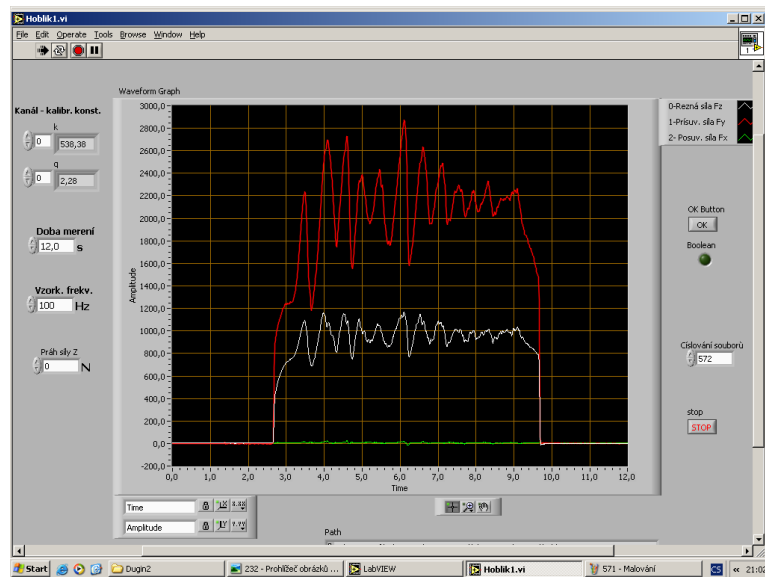
Konstrukční ocel 12 050.1. VB = 0,225 mm. ap = 0,075 mm.



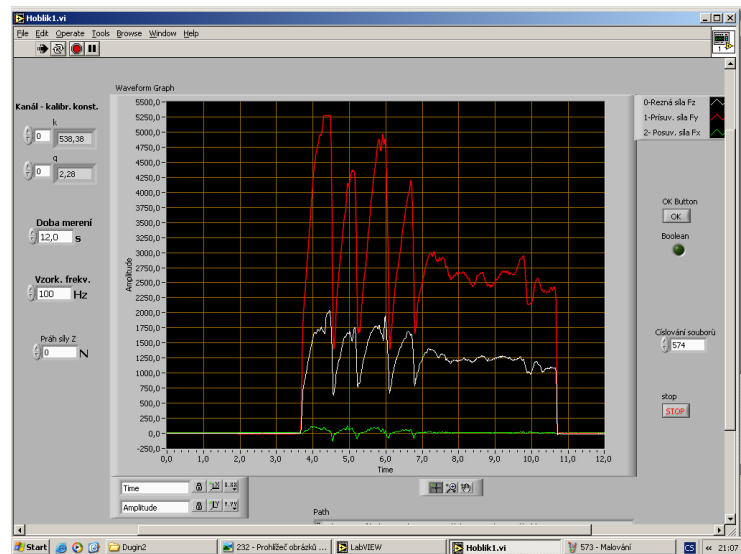
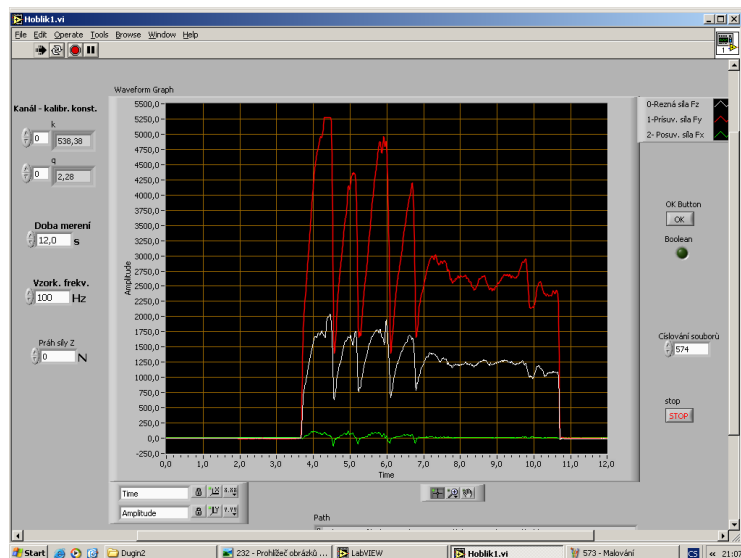


Nerez 17240. VB = 0,03 mm. ap = 0,025 mm.

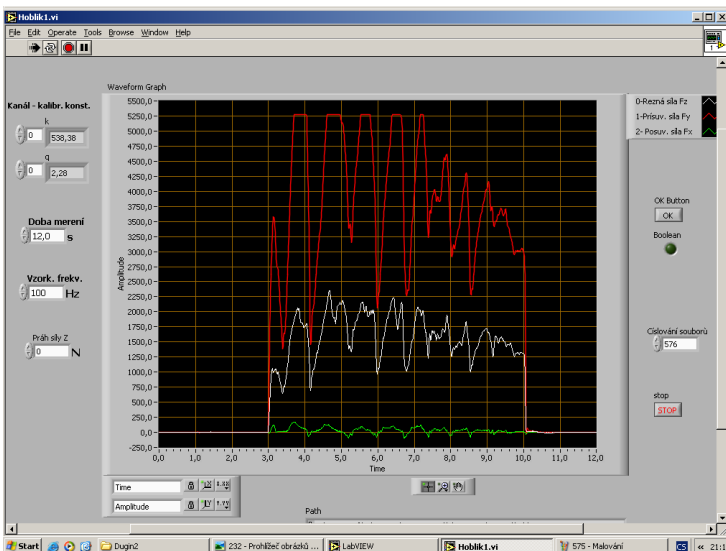
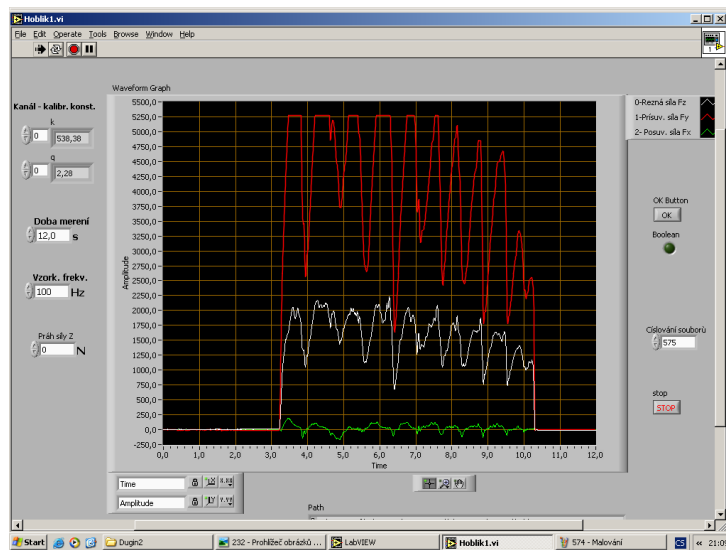




Nerez 17240. VB = 0,03 mm. ap = 0,05 mm.



Nerez 17240. $VB = 0,03 \text{ mm}$. $ap = 0,075 \text{ mm}$.



Příloha č. 2.

Hodnoty mikrotvrdosti na povrchu.

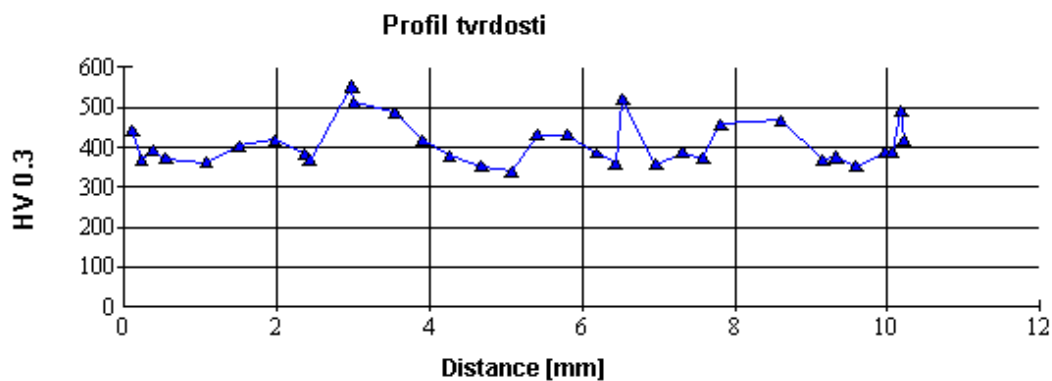
Tvrdost na povrchu vzorku 2 – 2 (nerez)

Metoda: Vickers
 Objektiv: 40x
 Zatížení: HV 0,3
 Doba zatížení: 12,000

	Oblast- povrch	Dist[μm]	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	drsnější	105,5	443,4	36,1	34,7	35,4
2	vypadaný	227,7	369,4	41,5	36,1	38,8
3	Mírně drsný	372,1	391,8	40,0	35,3	37,7
4	drsnější	539,7	371,3	39,2	38,2	38,7
5	Mírně drsný	1071,9	361,6	39,0	39,4	39,2
6	drsnější	1504,7	404,9	35,9	38,2	37,1
7	Mírně drsný	1972,9	418,8	37,0	35,9	36,4
8	drsnější	2364,5	383,4	35,5	40,7	38,1
9	vypadaný	2429,1	367,4	42,7	35,1	38,9
10	Hladší-mezi vypadaným	2985,3	552,8	32,9	30,6	31,7
11	Hladší-mezi vypadaným	3003,1	512,1	34,1	31,8	33,0
12	Hladší-mezi vypadaným	3549,9	487,5	33,7	33,9	33,8
13	Hladší-mezi vypadaným	3907,9	418,8	35,5	37,4	36,4
14	drsný	4259,3	379,3	40,2	36,3	38,3
15	Mírně drsný	4681,9	352,4	39,6	39,8	39,7
16	vypadaný	5067,7	340,0	40,2	40,7	40,5
17	Mírně drsný	5404,7	430,7	37,6	34,3	35,9
18	drsný	5803,5	430,6	38,8	33,1	35,9
19	vypadaný	6190,3	385,3	39,4	36,6	38,0
20	vypadaný	6431,5	359,8	38,0	40,7	39,3
21	drsný	6526,3	518,6	35,1	30,4	32,8
22	vypadaný	6963,9	357,6	35,6	43,3	39,4
23	drsnější	7310,7	387,6	36,5	39,2	37,9
24	drsnější	7579,3	371,3	45,2	32,2	38,7
25	Mírně drsný	7809,0	457,7	40,2	29,5	34,9
26	Mírně drsný	8600,3	467,5	32,2	36,8	34,5
27	Mírně drsný	9148,4	369,2	43,1	34,5	38,8
28	Mírně drsný	9327,5	375,3	37,8	39,2	38,5
29	Mírně drsný	9584,5	352,4	39,8	39,6	39,7
30	Mírně drsný	9973,5	387,6	38,0	37,8	37,9
31	Mírně drsný	10053,0	386,8	36,3	39,5	37,9
32	Mírně drsný	10172,7	492,2	40,8	26,5	33,6
33	Mírně drsný	10213,9	418,8	38,6	34,3	36,4

Minimum: 340,0
 Průměr: 409,2
 StDev: 54,709

Maximum: 552,8
 Medián: 387,6



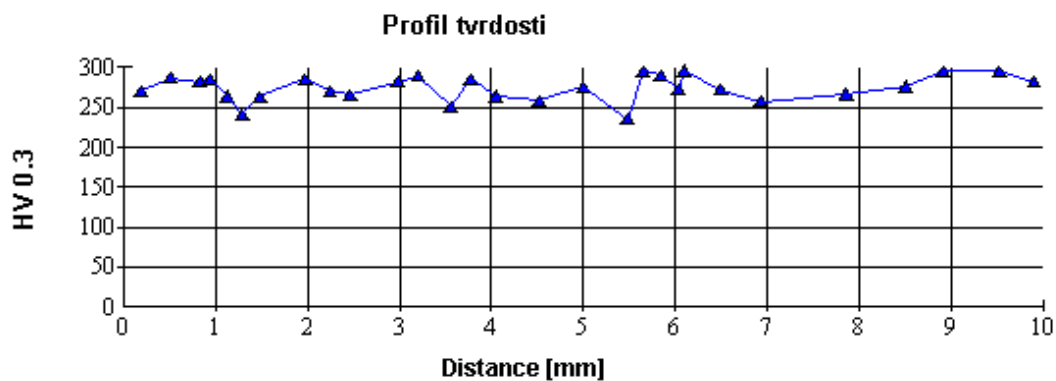
Tvrdost na povrchu vzorku 1 - 3 (ocel)

Metoda: Vickers
 Objektiv: 40x
 Zatížení: HV 0,3
 Doba zatížení: 12,000

	Dist[μm]	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	185,8	271,4	43,3	47,2	45,3
2	498,4	286,7	42,7	45,4	44,0
3	820,2	281,5	43,9	45,0	44,5
4	929,6	285,4	44,4	43,9	44,1
5	1121,6	264,1	46,6	45,2	45,9
6	1284,2	240,9	47,4	48,7	48,1
7	1475,1	262,9	45,8	46,2	46,0
8	1962,8	285,4	42,9	45,4	44,2
9	2239,6	271,3	45,8	44,8	45,3
10	2461,2	266,1	46,0	45,4	45,7
11	2982,2	281,5	41,9	47,0	44,5
12	3201,8	289,5	43,1	44,6	43,8
13	3556,6	251,5	44,8	49,3	47,0
14	3767,6	285,4	43,3	45,0	44,1
15	4050,8	264,1	45,8	46,0	45,9
16	4519,4	258,3	48,3	44,6	46,4
17	5003,0	275,1	43,9	46,0	45,0
18	5472,2	234,9	47,6	49,7	48,7
19	5645,4	295,0	41,9	45,0	43,4
20	5840,8	290,8	44,6	42,9	43,7
21	6033,4	272,6	46,8	43,5	45,2
22	6093,2	296,3	43,1	43,5	43,3
23	6496,0	272,6	45,0	45,4	45,2
24	6928,8	257,1	47,9	45,2	46,5
25	7866,8	266,4	46,0	45,4	45,7
26	8515,4	276,4	43,7	46,0	44,9
27	8918,2	294,9	43,1	43,7	43,4
28	9533,4	295,0	42,9	43,9	43,4
29	9905,2	281,5	43,5	45,4	44,5

Minimum: 234,9
 Průměr: 274,3
 StDev: 16,008

Maximum: 296,3
 Medián: 275,1



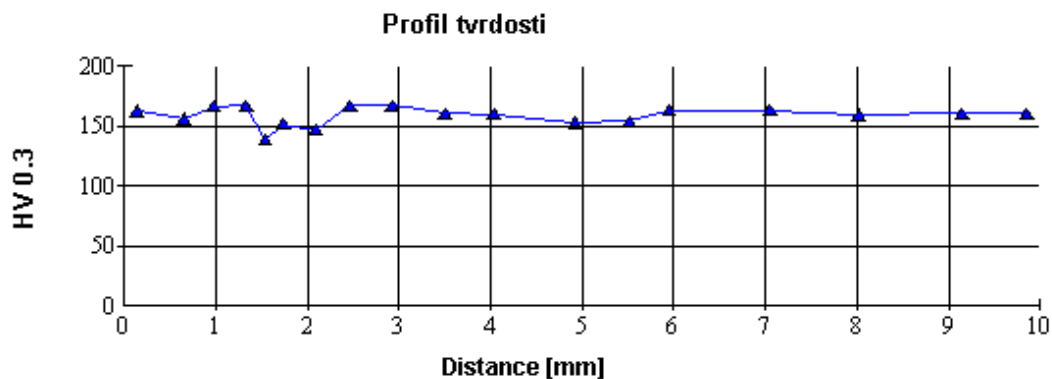
Tvrđost na povrchu vzorku 3 – 5 (Hliník)

Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0,3
Doba zatížení: 12,000

	Dist[μm]	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	143,5	163,0	60,2	56,7	58,4
2	657,1	156,4	61,4	57,9	59,6
3	977,2	167,1	57,5	57,9	57,7
4	1328,0	167,1	59,3	56,1	57,7
5	1539,1	139,0	62,4	64,1	63,3
6	1742,3	151,6	60,8	60,4	60,6
7	2085,9	146,6	61,8	61,4	61,6
8	2470,0	167,7	58,9	56,3	57,6
9	2923,5	167,1	57,7	57,7	57,7
10	3502,5	160,7	59,1	58,5	58,8
11	4030,9	160,2	60,8	57,1	58,9
12	4918,1	153,1	62,6	57,9	60,3
13	4918,5	153,7	62,6	57,7	60,2
14	5512,5	154,2	59,6	60,6	60,1
15	5946,4	163,6	59,1	57,5	58,3
16	7048,4	163,6	59,1	57,5	58,3
17	8019,7	159,6	58,1	60,0	59,0
18	9142,8	160,7	57,9	59,8	58,8
19	9845,2	160,7	56,7	61,0	58,8

Minimum: 139,0
Průměr: 158,7
StDev: 7,598

Maximum: 167,7
Medián: 160,7



Metoda: Vickers

Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0,3
Doba zatížení: 12,000

Tvrдост v jádře vzorku 2 – 1 (nerez)

	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	280,2	44,4	44,8	44,6
2	302,0	42,9	42,9	42,9
3	303,5	43,3	42,3	42,8
4	288,1	44,4	43,5	43,9

Minimum: 280,2 Maximum: 303,5
Průměr: **293,5** Medián: 295,1
StDev: 11,236

Tvrдост v jádře vzorku 2 – 2 (nerez)

	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	280,2	43,9	45,2	44,6
2	282,8	43,7	45,0	44,4
3	290,8	43,5	43,9	43,7
4	267,7	46,4	44,8	45,6

Minimum: 267,7 Maximum: 290,8
Průměr: **280,4** Medián: 281,5
StDev: 9,562

Tvrдост v jádře vzorku 2 – 3 (nerez)

	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	303,4	42,7	42,9	42,8
2	268,9	44,8	46,2	45,5
3	302,1	42,9	42,9	42,9
4	288,1	43,9	43,9	43,9

Minimum: 268,9 Maximum: 303,4
Průměr: **290,6** Medián: 295,1
StDev: 16,040

Tvrдост v jádře vzorku 2 – 4 (nerez)

	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	302,0	42,3	43,5	42,9
2	278,9	44,6	44,8	44,7
3	270,2	44,4	46,4	45,4
4	315,5	42,1	41,9	42,0

Minimum: 270,2 Maximum: 315,5
Průměr: **291,6** Medián: 290,5
StDev: 20,809

Tvrдост v jádře vzorku 1 – 3 (ocel)

	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	225,3	49,3	50,1	49,7
2	239,9	48,1	48,3	48,2
3	245,1	48,5	46,8	47,6
4	232,9	47,8	49,9	48,9

Minimum: 225,3 Maximum: 245,1
Průměr: **235,8** Medián: 236,4
StDev: 8,616

Tvrдост v jádře vzorku 3 – 5(Hliník)

	HV 0,3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	136,9	64,1	63,5	63,8
2	137,3	63,4	63,9	63,7
3	136,0	63,2	64,7	64,0
4	142,3	61,6	63,4	62,5

Minimum: 136,0 **Maximum:** 142,3

Průměr: **138,1** **Medián:** 137,1

StDev: 2,851